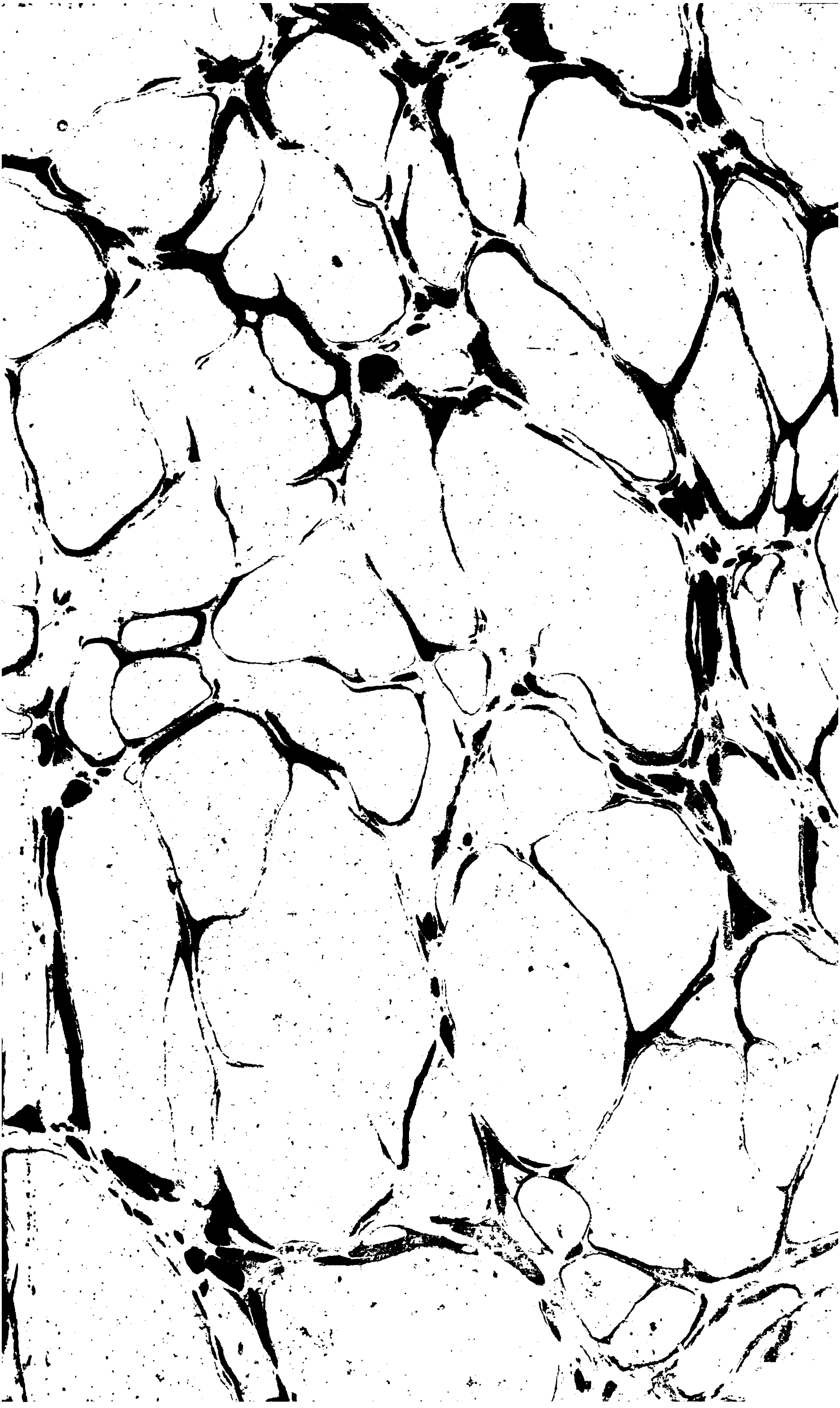


# ANNALES

DU

# CONSERVATOIRE

# DES ARTS ET MÉTIERS.

PARIS. — IMPRIMERIE GAUTHIER-VILLARS ET FILS,
55, QUAI DES GRANDS-AUGUSTINS.

# ANNALES

DU

# CONSERVATOIRE

## DES ARTS ET MÉTIERS,

PUBLIÉES PAR LES PROFESSEURS.

---

**2e SÉRIE. — TOME VIII.**

PARIS,
GAUTHIER-VILLARS ET FILS, IMPRIMEURS-LIBRAIRES
DU CONSERVATOIRE NATIONAL DES ARTS ET MÉTIERS,
Quai des Grands-Augustins, 55.

1896

ANNALES
DU
CONSERVATOIRE
DES ARTS ET MÉTIERS.

# LA SALUBRITÉ,

DISCOURS PRONONCÉ A BORDEAUX, LE 4 AOÛT 1895,
A L'OUVERTURE DU 24e CONGRÈS DE L'ASSOCIATION FRANÇAISE
POUR L'AVANCEMENT DES SCIENCES,

Par M. Émile TRÉLAT,
Président de l'Association, Député de la Seine,
Professeur honoraire au Conservatoire National des Arts et Métiers,
Directeur de l'École spéciale d'Architecture,
Architecte en chef honoraire du Département de la Seine.

MESDAMES, MESSIEURS,

Je salue Bordeaux. Je salue la cité qui fut le berceau de notre Association et qui nous ramène aujourd'hui chez elle. Mais ce salut ne saurait tenir dans un mot.

La France, vaincue dans les batailles, s'était précipitée dans le travail. Elle réparait ses ruines et payait sa rançon. L'Association française pour l'avancement des Sciences, œuvre de relèvement national, venait de se constituer. Invitée par Bordeaux à venir siéger ici, elle y ouvrit son premier Congrès le 5 septembre 1872. Les murs de ce grand quartier général de

la résistance en province résonnaient encore des bruits de la guerre. On entendait encore l'écho des brûlantes proclamations qui avaient soulevé le patriotisme de la nation et sauvé l'honneur du pays. En arrivant ici, l'Association portait les deuils des deux savants qu'elle avait successivement mis à sa tête. En six mois, elle avait coup sur coup perdu ses deux premiers présidents : Combes et Delaunay. Il semblait que la fortune implacable voulût joindre, dans un même baptême de régénération, notre jeune Association décapitée et la patrie amputée.... C'est, Messieurs, dans ces imposantes conjonctures que notre Société inaugura son œuvre.

Quatrefages présidait. Son discours franc et haut, grave et résolu, sonna dans les cœurs comme un fier serment de relever la France. MM. Fourcand, maire de Bordeaux; Cornu, secrétaire général de l'œuvre; Masson, trésorier, parlèrent à leur tour. Puis trois conférences de MM. le docteur Alphonse Guérin, le colonel Laussedat, l'abbé Durand achevèrent de marquer la tâche commune. Cette mémorable séance fixa et lia dans toutes les mémoires deux mots devenus notre maxime : Science, Patrie.

Le Congrès réunissait huit cents membres. Les Sections y reçurent cent quatre-vingt-cinq communications. On y écouta onze conférences, parmi lesquelles celles de Perrier sur la méridienne de France et celle de Broca sur les troglodytes de la Vézère. Au milieu des sept excursions qui furent accomplies, Broca, impatient de fournir les preuves indéniables de l'homme quaternaire, plaça et dirigea les curieuses visites des grottes des Eyzies et de Cro-Magnon.

Ainsi se conduisit le Congrès de 1872. Il avait d'emblée brillamment mis en œuvre toutes les branches statutaires de son rôle, sauf la distribution des encouragements scientifiques qui ne pouvait être réalisée qu'avec le temps. Ce fut un succès éclatant ! Il assurait l'avenir. Il faut ici, Messieurs, parler de la haute gratitude que l'Association française pour l'avancement des Sciences doit aux Bordelais. Je la leur exprime solennellement de cette place, en rappelant que c'est leur initiative, leur nombre, les collègues distingués que nous avons

trouvés chez eux, leur généreuse sympathie, aujourd'hui renouvelée, qui nous ont donné notre première victoire, l'une des plus belles manifestations patriotiques de la France accablée.

*
* *

En me confiant ce fauteuil, Messieurs, vous m'avez fait un honneur, dont je garderai toujours la haute fierté. En fixant mon poste ici, vous avez grandi mon rôle, et j'en ai douce joie. Mais, laissez-moi le dire, vous avez rendu ma tâche bien difficile, si difficile que je me demande encore maintenant si je pourrai l'accomplir. Comment oublier que cette rentrée à Bordeaux est un recommencement; que, bien qu'il y manque un point, ce sont aujourd'hui de véritables noces d'argent qui nous rassemblent. Et s'il en est ainsi, ne faut-il pas voir ce qu'ont été les vingt-quatre années d'existence de l'Association? — Les choses se sont-elles bien passées? — A-t-on bien ou mal agi? — Doit-on oublier ou se féliciter, regretter ou applaudir? — Et, à travers le temps qui s'ouvre, va-t-on marcher dans l'incertitude et la crainte, ou dans l'espoir et la confiance? Ces questions, inséparables du retour au foyer bordelais, m'ont pris, je l'avoue, et gardé prisonnier.

Je crois avoir été, Messieurs, un des plus assidus serviteurs de l'Association et l'un des plus exacts congressistes. Cela ne veut pas dire que j'aie connu tout ce qui s'est fait dans nos Sections. Il y en a dix-huit; et elles fonctionnent simultanément! Heureusement que, grâce à la forte direction de M. Gariel, notre savant, vaillant et précieux secrétaire du Conseil, tous nos travaux sont publiés. Cela nous fait aujourd'hui la bagatelle de trente-trois volumes fort compacts. Ils ne pèsent ensemble pas moins de $70^{kg}$, contiennent cinquante mille pages de texte serré et rendent exactement compte de cinq mille communications faites aux Sections.

La Garonne, Messieurs, coule à quelques pas d'ici. Vous connaissez l'amour des habitants de ses rives pour les riches envolées de l'esprit et les fortes amplifications. Le lieu est propice et l'occasion me serait belle de vous faire le portrait du

malheureux qui aurait lu cinquante mille grandes pages d'impression avant de venir vous présider.

Mais non, Messieurs, je n'ai pas tant lu : et je m'estime en conséquence d'autant plus libre de m'entretenir pertinemment avec vous. N'allez pas croire, pourtant, que j'aie dédaigné nos volumes. Oh! non.

Je les ai soigneusement rangés, il y a quelques semaines, autour de ma table de travail. Ils étaient bien là, trente-trois, tous objets d'un commerce convoité. Ce furent le hasard de la main ou la fantaisie de l'œil qui commencèrent : j'ouvris celui-ci ; puis celui-là; puis cet autre.... Mais bientôt, sollicité par l'autorité des auteurs, par l'imprévu des sujets, par l'abondance des tables, la curiosité de mon esprit s'ordonna et je fus pris dans un engrenage, qui ne me laissa plus de loisirs. Toutes leurs heures y passèrent. Mais aussi quel profit n'ai-je pas moi-même tiré de ces hâtives reconnaissances dans un si large fonds! Je veux le déclarer ici, Messieurs : nos publications sont remarquablement instructives. Comme dans toutes les collections, on y trouve de très bonnes, de bonnes et de médiocres études. Mais la mine dévoile sa richesse quand on l'interroge d'ensemble. C'est malheureusement, je le sais, ce que nous ne faisons pas. Nous allons au Congrès, nous y apportons nos personnes et nos communications, nous suivons les travaux de nos Sections, nous écoutons les conférences, nous participons aux excursions. C'est très bien! —Mais, plus tard, nous recevons chez nous le volume de la session et nous le rangeons soigneusement dans notre bibliothèque, sans songer même à le couper. Nous ne savons jamais ainsi ce qu'il contient, ... à moins d'être, en 1895, président de l'Association à Bordeaux, vingt-quatre ans après la fondation. — Mais c'est une confession, direz-vous? — Eh! oui, Messieurs, c'est une confession. Je la fais dans l'espoir d'accroître ou de faire naître parmi nous l'usage de nos documents imprimés.

Messieurs, la conférence est le second procédé d'expansion scientifique dont nous usons. Depuis la fusion de l'Association scientifique avec l'Association française pour l'avancement des Sciences, c'est-à-dire depuis dix ans, nous avons ajouté à nos

conférences de Congrès des conférences qui se font l'hiver à Paris. En remontant jusqu'à l'origine de notre œuvre, nous comptons avoir ainsi produit une centaine de conférences. Elles ont brillé, et quelquefois d'un grand éclat, non seulement par l'importance ou l'actualité des sujets traités, mais aussi par le relief que leur donnait la distinction ou la célébrité des conférenciers. Nous ne saurions trop nous appliquer à l'entretien et au développement de ce mode d'action.

J'ai hâte, Messieurs, de porter votre attention sur les discours prononcés en séance d'ouverture par les présidents des Congrès. Je les avais quasi tous entendus. Mais je viens de les lire; et de cette lecture je garde une impression que je ne saurais vous taire.

Je ne connais, Messieurs, rien de plus éducateur que ces hautes confessions intellectuelles, où s'engagent à fond les convictions les plus intimes de ceux qui les écrivent; où, jaloux d'apporter toute sa contribution, chacun s'efforce de dévoiler à son auditoire la portée de ses vues et l'étendue de son horizon. Je ne connais rien de plus imposant que cette opulente collection, que l'on interroge toujours avec la certitude de recueillir des acquisitions consacrées, des idées faites ou des perspectives généreuses. Les convenances ne me permettent pas de distinguer ici chacune des précieuses études de mes prédécesseurs, parmi lesquels je reconnais tant d'illustrations. Le temps même me manque pour vous signaler tous les discours des grands morts qui nous ont présidés. Je me borne à l'un d'eux. Voici comment le président Wurtz ouvrit le Congrès de Lille.

Son discours porte un titre superbe : *La théorie des Atomes dans la conception générale du Monde*. C'est un morceau sans pareil. La composition et la forme y disputent la palme à l'immensité du fonds. L'auteur — en cela grand artiste — entre en parole sur un nom d'homme : son premier mot est François Bacon. Il ne se taira qu'au bord de l'inaccessible intellectuel, sur le mot Dieu. L'Atlantide de Bacon, qui est une société où tout est ordonné pour la recherche de la vérité par voie d'observation et d'expérience, lui sert d'exorde. En

assignant ainsi à la Science sa vraie méthode, Bacon ne pouvait paraître, au XVI[e] siècle, qu'un utopiste ; « aujourd'hui son utopie est une réalité », s'écrie Wurtz. Il se jette alors tout entier dans son sujet — et avec quelle fougue ! — C'est l'atome qu'il vise. Il le poursuivra sans relâche, et de fuite en fuite, jusqu'à soumission complète. Voici d'abord le maître, l'immortel Lavoisier, qui lui ouvre la voie, avec sa notion des corps simples et sa dualité des combinaisons chimiques. Bientôt la théorie se consolide par l'hypothèse électrochimique qui engendre l'Affinité. Puis, les phénomènes s'enferment dans l'inflexible précision des formules binaires. — Ah ! Messieurs, voici l'avènement des Atomes, qui s'adaptent à la Science et l'éclairent par la simplicité et l'immutabilité de leurs proportions dans les composés. On dirait que tout est désormais fixé !

Tout se trouble, au contraire. On rencontre des composés tels que le cyanogène, qui se comportent comme des corps simples dans les combinaisons. On les appellera des Radicaux pour leur faire une place dans les formules. — Mais voici que les analyses démontrent que la matière essentielle des corps organiques ne contient jamais plus de trois ou quatre corps simples, tandis que les individus caractérisés par leurs propriétés mêmes sont innombrables. Les rigides formules de la nomenclature ne peuvent plus les traduire. On ne sait plus écrire; on ne s'entend plus. — Alors Dumas intervient victorieusement avec sa théorie des substitutions, qui laissent entrevoir dans les molécules de véritables édifices d'atomes susceptibles d'instaurations variées. Puis, Laurent et Gerhardt fixent cette idée dans les types atomiques, dont les molécules, conservant invariablement leur géométrie propre, sont capables de porter certaines substitutions d'atomes qui métamorphosent leurs propriétés. La place est ainsi faite à la multitude des molécules organiques. Elles se groupent en famille de dérivés autour de leurs types. Elles s'inscrivent enfin dans des formules marquant, pour chacun de leurs atomes, non seulement sa nature et son nombre, mais aussi son arrangement.

Voilà, Messieurs, l'atome du chimiste et son jeu ! — Il fallait voir l'entrain, l'abondance d'images, la prestesse et la chaleur de diction de Wurtz passant à travers ce dédale d'idées, dont

je viens de vous fournir la sèche et incolore analyse. Mais il n'est pas au bout de son sujet. Il parlera désormais en Physicien, et je marque les traits de sa progression.

Pour le Physicien, l'atome est un point matériel infiniment restreint, pesant, pourvu d'une invariable capacité calorifique, d'une infinie capacité vibratoire. Il est en vibration permanente et modifiable dans sa fréquence et son intensité. L'atome est, à vrai dire, le lieu d'aboutissement et d'expression des forces de la nature. Il en est l'avide récepteur, et il en subit l'action avec une extrême docilité. Ses vibrations s'accélèrent ou s'attardent instantanément suivant les variations d'énergie des forces qui les attaquent.

Il y a toujours inégalité d'intensité vibratoire entre les corps, collections d'atomes, ou les mondes, collections de corps; d'où, causes incessantes d'échanges entre les états vibratoires.

L'impondérable et universel Éther, qui est en contact avec la matière partout où elle existe, est tributaire de ses différents états vibratoires. Il les subit, en prend les vibrations et, dans son interminable continuité, les transmet universellement et réciproquement entre les corps et les atomes. Si bien que l'Éther est l'universel messager, qui pourvoit aux échanges des vibrations matérielles.

Ces vibrations infiniment entrelacées dans l'espace font les mouvements et les forces de la nature. Comme elles sont sensibles à nos organes, nous les nommons Chaleur et Lumière. Mais, dans leurs pérégrinations infinies, elles s'attardent dans les corps et s'emmagasinent dans les atomes auxquels elles prêtent les forces de l'Affinité, ainsi qu'on l'observe dans les principes immédiats des cellules végétales. A son tour, cette affinité se dépense : soit en *chaleur*, comme dans les combustions; soit en *électricité*, comme dans l'usure d'un métal baigné d'un acide, qu'il décompose; soit en *action dynamique*, comme dans la fusion et la volatilisation, dont les chaleurs latentes, hier mystérieuses, se montrent désormais transformées en travail mécanique écartant des molécules.

Après avoir partout surpris la présence de l'atome dans le monde de la matière, précisé son rôle de vibrateur ininterrompu, marqué les influences qu'il subit et montré les réactions

qu'il exerce dans les mouvements de la nature, Wurtz apprécie les grands phénomènes auxquels il participe dans l'Univers.

L'irrésistible spectroscope nous a révélé la chimie du Soleil. Mais il n'a pas fait que cela : il nous a fait connaître, dans les profondeurs du ciel, les chimies des étoiles et des nébuleuses insaisissables aux plus puissants télescopes. On sait que les corps qui composent notre planète se retrouvent dans la nature de tous les mondes, plus ou moins condensés, plus ou moins combinés, suivant les âges de ces mondes. On sait même apprécier ces âges. Il y a des étoiles blanches, des étoiles jaunes, des étoiles colorées, que l'observation autorise à désigner sous le nom d'étoiles jeunes, d'étoiles d'âge moyen, d'étoiles vieilles.

L'étendue de l'Univers est incommensurable, sa durée est incommensurable, son travail est incommensurable. Mais dans la grandeur infinie des scènes auxquelles il assiste, et de leur apparente complexité, l'esprit humain dégage des clartés apaisantes. Il en arrive à pressentir, puis à concevoir la prodigieuse simplicité de l'ordonnance qui détient le monde. Il constate l'immensité des forces qui l'agitent, et il en emprunte les bienfaits. C'est à la Science que sont dues ces merveilleuses conquêtes. Elles lui permettront peut-être de dire un jour : Je connais en entier la machine universelle; — tout m'est dévoilé dans le mystère et l'immensité de son sublime fonctionnement. Wurtz s'en enorgueillit hautement au nom de l'humanité. Mais « c'est en vain, dit-il, que la Science aura révélé à l'homme la structure du monde et l'ordre de tous les phénomènes; il veut remonter plus haut; et, dans la conviction instinctive que les choses n'ont pas en elles-mêmes leur raison d'être, leur support, leur origine, il est conduit à les subordonner à une cause première, unique, universelle : Dieu. »

En vous rappelant ce discours, j'ai voulu, non seulement redire ici de belles choses, mais surtout montrer à nos recrues l'étendue de science et la hauteur de pensée que nos Présidents se sont efforcés de mettre au service de l'Association.

J'aurai, Messieurs, terminé la tâche exceptionnelle que les circonstances m'ont donnée, si je vous dis que, depuis sa fon-

dation, l'Association française a siégé dans vingt-trois cités, petits chefs-lieux, grandes villes ou capitale, et qu'elle y a pénétré une population de cinq millions de Français. — Croyons, Messieurs, qu'elle a bien préparé l'avenir.

* * *

# LA SALUBRITÉ.

MESDAMES, MESSIEURS,

J'entre en scène à mon tour. Le temps m'est mesuré et me commande la discrétion. Je tâcherai d'être court, en traitant du plus haut que je le pourrai l'étude que je vous dois. Son titre est *la Salubrité*.

Il s'est fait depuis vingt ans une nouvelle Science spéciale. Je dis nouvelle, quoiqu'elle porte un très vieux titre : *Hygiène*. Elle a gardé ce nom parce qu'il est beau et vrai, Hygie étant l'antique déesse de la Santé. La vieille Hygiène s'occupait de la conservation de la santé; la nouvelle Hygiène s'occupe de la conservation et de la préservation de la santé. La vieille Hygiène procédait de l'empirisme; la nouvelle Hygiène, qui met vigoureusement à contribution toutes les Sciences, s'est déjà fait elle-même un respectable bagage porté sur l'expérience et l'observation.

La santé de l'homme est tributaire des milieux qu'il occupe et des régimes qu'il suit. Des milieux salubres et des régimes sains entretiennent la santé; des milieux insalubres et des régimes malsains la malmènent ou la ruinent. L'Hygiène comprend donc deux parties : l'hygiène des milieux et l'hygiène des régimes. Nous donnerons le nom de *salubrité* à l'hygiène des milieux, et c'est celle dont j'ai l'intention de vous entretenir aujourd'hui.

Je vous ai dit, Messieurs, que la nouvelle hygiène tire tous ses biens de l'observation. Observons donc. Que faut-il en-

tendre par milieu salubre? — La nature va nous répondre.

Il y a, vous le savez, Messieurs, des portions de la terre inhabitées parce qu'elles sont inhabitables, comme les contrées polaires. Il y en a qui sont réfractaires à la vie posée et que l'homme traverse à peine, comme les déserts. Il y a enfin des contrées hospitalières que les races se sont de tout temps disputées et où la civilisation a placé ses assises et développé ses bienfaits. On les nomme zones tempérées ou contrées à saisons. Elles ne réunissent pas également et partout les meilleures conditions naturelles de l'existence; mais c'est chez elles qu'on les trouve; c'est chez elles qu'est notre France.

Je vise ici l'une de ces localités de prédilection. C'est la commune *Hygie*. On s'y porte généralement bien. On y compte peu de malades et l'on y vit longtemps. On le sait : cette bonne réputation date de loin; les générations se la sont transmise et les statistiques modernes l'ont confirmée. On voit autour de la fontaine les femmes babiller et rire en emplissant d'eau claire leurs brillantes cruches de grès. D'ailleurs, les hommes vigoureux et laborieux aménagent bien leurs champs; les demeures sont spacieuses et dispersées. La population prospère et s'accroît dans l'aisance. Hygie est un *milieu salubre*.

Restons dans la même contrée; mais passons dans une autre commune. Allons à *Noson;* ce n'est pas loin. Ah! ici les choses sont changées. On y est certainement encore laborieux. On y gagne même beaucoup plus d'argent qu'à *Hygie,* le travail étant industriel et plus rémunérateur. Mais les logements sont ramassés dans les nombreux étages de maisons hautes et contiguës. Les rues sont étroites et souvent sordides. Les habitants boivent l'eau de puits voisins des fosses d'aisances, ou l'eau de la rivière, qui serpente à travers les herbes et les souillures des ruisseaux et des lavandières. — Que dit ici la statistique? — La population chétive est hantée par les maladies devenues fréquentes; elle est maltraitée par la mort; elle se reproduit mal et décroît. Chose singulière! On gagne plus d'argent et l'on ne connaît plus l'aisance, mère de la propreté. Noson est un *milieu insalubre*.

Voudriez-vous déjà, Messieurs, inférer de ce contraste que les localités rurales sont salubres et que les localités indus-

trielles sont insalubres ; que le travail des champs crée l'aisance et que celui des agglomérations ouvre la porte à la gêne, peut-être à la misère? Quelque vraisemblance que comportent ces affirmations, elles seraient trop hâtives et leurs formules trop absolues pour servir de conclusion scientifique à des phénomènes aussi complexes que ceux que je viens de décrire. L'hygiéniste est plus sévère. Il lui faut des vérités directement prouvées. Il les cherche et les trouve ici dans le nombre des observations, dans la variété des circonstances, dans la séparation des causes multiples et dans la constance d'un même résultat.

Il constate ainsi que, si l'insalubrité est connexe des agglomérations industrielles, elle l'est aussi de l'agglomération des camps, de l'agglomération des casernes, de l'agglomération des écoles, de l'agglomération des grandes maisons à petits logements, etc., etc... Et alors c'est l'agglomération, le voisinage extrême et continu de nombreuses existences humaines dans un espace restreint qui cause l'insalubrité du milieu. L'hygiéniste donne à cette cause spéciale le nom d'*encombrement*. L'encombrement n'est pas le seul corrupteur des milieux artificiels que créent nos installations sociales. C'en est certainement de beaucoup le plus funeste et celui qui posera aux salubristes les problèmes les plus ardus.

Mais, Messieurs, la notion de l'insalubrité que nous fournit Noson n'est qu'une indication négative. Il est temps d'arriver à la conception positive de la salubrité. Retournons à Hygie, et demandons-lui ce qui cause sa salubrité. Nous devrons, pour le découvrir, y regarder d'un peu plus près et mieux connaître le territoire.

Le petit village est situé sur les rampes du fleuve, à quelque deux cents kilomètres de son embouchure, à mi-côte méridionale et sous le vent de la grande vallée ouverte à l'Océan. Le pays est mamelonné. Hygie s'adosse aux collines boisées qui l'enceignent à l'Est et au Nord, et où sourdent de belles eaux pures. Le sol incliné, graveleux et maigre, retient mal les eaux et commande le travail pour produire. J'ai quelquefois parlé de ce bienheureux village et j'ai dit : « Ses maisons isolées dans les grands jardins, et montées sur caves,

n'ont pas d'étages. Entre les haies, on voit éclater, comme des paillettes lumineuses, leurs petites faces de pierre blanche. Tout autour, les ceps descendent en longues raies sur les flancs du coteau et montrent, dans la netteté de leurs intervalles, la forte vigilance du vigneron. » Quelles sont donc, Messieurs, les faveurs que la nature a faites à ces francs paysans d'Hygie pour qu'ils portent tant de vigueur aux champs et comptent si peu de malades au hameau? C'est ce que l'Hygiène doit établir.

Je remarque d'abord qu'à Hygie l'air est pur. Il est pur pour plusieurs raisons. La première, c'est qu'il arrive de l'Océan où, comme sur toutes les grandes nappes des mers, il ne se produit aucunes poussières; et où les pluies l'ont débarrassé de celles que lui ont envoyées les continents. Sur ceux-ci, au contraire, les poussières se renouvellent sans cesse. Loin des villes, elles s'alimentent de l'incessante usure des reliefs terrestres travaillés par les forces météorologiques. Autour des villes, elles s'emplissent et s'infectent de toutes les déjections volatilisables dans les encombrements, et deviennent ce que mon ami, le Dr Rochard, nomme si pittoresquement et si justement les *fumiers* de l'atmosphère. — Mais à Hygie l'air que respirent les habitants n'est pas pur uniquement parce qu'il est sainement alimenté. Il l'est encore parce qu'il n'est pas infecté sur place. En effet, comme il n'y a ici aucun encombrement, les existences étant très dispersées, les détritus gazeux sont très peu importants relativement à l'étendue de l'ambiance atmosphérique, qui les dilue et les emporte promptement dans ses continuels déplacements. D'ailleurs — j'ai omis de le dire — Hygie est une localité très convenablement visitée par les pluies, qui lui procurent un nettoyage supplémentaire de son air. — Ainsi vous apprécierez, Messieurs, combien à Hygie le principal organe de l'activité humaine, le poumon, est entouré par la nature de précautions salutaires.

Passons maintenant à une autre observation. Notre village, situé à soixante mètres au-dessus du niveau de la mer, domine

de quarante mètres celui de son fleuve. Il est par là mis à l'abri des lourds et paresseux brouillards, qui stagnent trop souvent à la surface des grands cours d'eau et qui coiffent d'un si pénible demi-jour ceux qui en sont enveloppés. Un ciel ample, qui comprend le tiers de la calotte céleste, environne l'Hygien. Découvert ou voilé, le soleil répand autour de lui l'infinie variété des éclairages qui parent les sites, et mettent dans les yeux les joies de bien vivre. Je ne veux pas déborder mon sujet; et, bien vite, à côté de l'indiscutable influence salutaire que les spectacles de la nature exercent sur la santé, je place l'action physiologique de la franche lumière du ciel sur nos organes. Elle est d'abord l'indispensable excitateur de leur fonctionnement. Mais en outre elle agit directement sur la peau. La peau remplit dans l'économie un rôle important : elle maintient la normalité de la température du corps. Elle y emploie un appareil complexe et délicat qui exige chez elle beaucoup de souplesse, d'élasticité et de solidité. Ces capacités ne se développent entièrement que sous l'action directe de la lumière, dont la peau montre ensuite l'empreinte colorée; et vous voyez d'ici le ton soutenu des chairs des Hygiens.

Faut-il vous parler, Messieurs, d'une dernière capacité de la lumière profitable à la salubrité? Il paraît définitivement prouvé, par des expériences récentes et fort autorisées, que la pleine lumière est *bactéricide*, qu'elle tue les microbes qui voyagent dans l'air. Je le veux bien! — Mais nous inspirons tous, et constamment, de formidables quantités de microbes; et nous n'en expirons aucuns. Leur présence dans l'air ne paraît donc nullement menacer nos santés. Il est bien vraisemblable que les méchants microbes, les pathogènes, qui ne sont heureusement qu'infime minorité, placent autre part que dans l'air leurs pérégrinations.

Mais je pense, Messieurs, vous en avoir assez dit sur la lumière pour vous faire apprécier les bienfaits de celle d'Hygie.

Les Hygiens aiment beaucoup leur terroir, leurs collines et les sources qui bruissent au sommet sous les bois. Ils ont bien raison! Mais savent-ils pourquoi? — A-t-on jamais besoin de savoir pourquoi on aime? — Pour nous, c'est néces-

saire : nous avons grand besoin de savoir pourquoi les Hygiens ont raison d'aimer ces choses.

Et pourtant il est dur à travailler, leur sol ! Il faut, pour qu'il produise, y apporter beaucoup de soins, de régularité, de peine, et des sueurs. Oui ; mais il est exempt de toute pestilence. — Il y a donc des sols pestilentiels? — Ce n'est pas douteux. Ce sont les sols où séjournent sans se décomposer promptement tous les matériaux qui ont vécu ou qui ont été consommés pendant la vie : telles les contrées où le sol est imperméable et plat, où les eaux sont stagnantes. Tout ce qui y meurt, animaux de toutes sortes, insectes de toutes grosseurs, végétaux de toutes natures, entre dans une pourriture lente et longue, véritable laboratoire de méphitisme et source de fièvres ou de maladies mortelles. On ne connaît rien de cela à Hygie, où le sol est incliné et poreux. Toutes les fois qu'une immondice y est déposée, elle subit sous l'action météorologique le traitement suivant : « Les pluies la dispersent, la dissolvent et l'entraînent en partie; le reste pénètre avec l'eau dans le sol et s'y ramifie en cheminements extraordinairement ténus. Quand la sécheresse vient, l'air y pénètre à son tour et les molécules d'oxygène s'emparent une à une de toutes les molécules oxydables de la dilution. Les nouvelles combinaisons se fixent en terre ou se portent sur les végétations qu'elles multiplient et amplifient. Puis le résidu liquide, devenu eau absolument pure, descend et pleure sur la nappe souterraine, qui voyage, et qui émergera à la première issue en source limpide et saine. » Ainsi le sol d'Hygie se fait l'*épurateur* de tous les déchets des existences animales. Ainsi expliquions-nous et décrivais-je moi-même, il y a quinze ans, le beau phénomène de l'épuration des eaux d'égout par les sols poreux.

Mais quelle ampleur et quelle solidité cette explication, déjà si reposante, n'a-t-elle pas trouvées dans la connaissance que nous possédons aujourd'hui du monde des infiniment petits, de l'immense rôle qu'il accomplit dans la nature et de son étourdissante activité ! Je me rappelle encore la surprise que causa la curieuse expérience de MM. Schlœsing et Müntz, montrant que, dans une terre calcaire imprégnée d'eau d'égout, l'oxydation de l'azote et sa nitrification ne se produi-

saient et ne pouvaient se produire que par l'intervention de certains organismes. Leur démonstration était bien saisissante! L'observation constatait la promptitude et l'extrême régularité des combinaisons, lorsqu'on laissait courir les choses. Mais quand on chloroformisait la terre, l'anesthésie des organismes se produisait, leur activité s'éteignait; et, du même coup, cessaient les oxydations. L'épreuve répétée donnait toujours les mêmes résultats. Elle était concluante. Soudainement dès lors s'ouvrait devant l'esprit un chantier souterrain empli d'infiniment petits travailleurs qui transportaient des atomes d'oxygène à des atomes d'azote, ou réciproquement. Un jour, dans l'entraînement d'une leçon, j'élevai devant mes auditeurs ces invisibles travailleurs à la dignité de fonctionnaires en les appelant les facteurs ruraux des atomes.

Depuis, le temps a marché, la Science s'est enrichie et l'on sait maintenant qu'indépendamment du *microcoque* de Schlœsing et Müntz, un très grand nombre d'espèces se partagent la tâche souterraine de dégager des détritus de la vie les éléments qui doivent y rentrer dans de nouvelles combinaisons. Ces organismes habitent les cadavres, les eaux polluées et les parties supérieures des sols poreux, où, par les pluies, ils entrent en communication facile avec tout ce qui meurt à la surface. On les nomme en général *saprogènes,* parce qu'ils travaillent dans la saleté. Ils sont aussi petits qu'innombrables. Mais ce sont des bienfaiteurs pour toutes les races qui vivent à la lumière des cieux. — Ne trouvez-vous pas, Messieurs, tout cela bien fait pour légitimer l'amour que les Hygiens portent à leur terroir?

Je voudrais vous montrer que cela donne en même temps force et raison à la prédilection qu'ils accordent à leurs sources.

Où se trouvent, en effet, ces sources? — Sur les bords des bois, entre le roc qui affleure au flanc de la colline, et les sables qui le surmontent. Que se passe-t-il là? — Sous le bois, le sable s'est couvert d'humus, produit des détritus végétaux et des cadavres des insectes locaux. Quand les pluies arrivent, elles s'emmagasinent dans la masse forestière et dans l'humus, où elles se salissent et se gâtent. Mais elles descendent bientôt dans les pores du sable, où elles rencontrent les bienfaisants

saprogènes, qui les dépouillent de leurs impuretés. Quand elles reparaissent au jour à l'affleurement du roc, elles coulent eau de source, limpides et fraîches.

Hygie passe pour une localité qui jouit d'une remarquable constance de température. Les écarts du thermomètre y sont très réduits relativement à ceux des contrées de même latitude et de même altitude.

Il y a pour cela deux causes. La première est la proximité de l'Océan, masse énorme, qui propage assez loin dans les bassins l'influence de la stabilité de sa température. Aussi dit-on que ces contrées jouissent d'un climat maritime. — Pour définir la seconde cause de la douce température d'Hygie, j'ai besoin d'expliquer les voies que suit la chaleur pour nous influencer. On croit généralement que l'atmosphère ambiante est le facteur principal des sensations de chaud ou de froid que nous éprouvons. C'est une erreur. L'atmosphère n'est jamais pour nous qu'une cause passagère de trouble thermique, quand ses mouvements s'accentuent. En réalité, ce sont les corps solides de notre ambiance qui agissent sur nous en chaud et en froid; et cette action est proportionnelle à leurs développements et à leurs intensités de température. Ordinairement on dit qu'ils rayonnent du chaud ou du froid sur nous. Il serait plus exact de dire que les vibrations calorifiques des solides voisins nous sont communiquées par l'éther, vibrant à leur unisson. Mais peu importe; ce qu'il faut retenir ici, c'est l'influence capitale de la température des solides de l'ambiance sur notre état thermique. Quels sont donc pour nous les solides de voisinage? Quand nous sommes en plein air, c'est le sol. Mais le sol jouit d'une grande constance de température. Bien que, dans nos climats, il gèle l'hiver à la surface, et qu'il s'échauffe notablement l'été, sa température est constante à une assez faible profondeur, ce qui permet de le considérer comme un véritable *volant* de la température.

D'autre part, le sol prend autour de nous des figures géométriques très diverses. Il est plaine, ou il est montagne. Il fuit de tous côtés sous nos yeux, ou il se ramasse en nous enfermant dans ses plis. Dans le premier cas, son action calori-

fique est minimum. Elle grandit à mesure que le relief se resserre. — N'en ai-je pas assez dit, Messieurs, pour que nous félicitions ensemble les Hygiens d'aimer le relief local, qui contribue tant à régler la douceur de leur climat?

Remarquons, Messieurs, combien, en y regardant de près, à Hygie, nous avons éclairé notre sujet. N'avons-nous pas saisi et, pour ainsi dire, capté à leurs émergences mêmes les sources de la belle santé des Hygiens? Et, si je vous dis que les circonstances réunies à Hygie se retrouvent dans toutes les localités salubres et font défaut dans les localités insalubres, ne serez-vous pas convaincus qu'un milieu est salubre lorsqu'on y rencontre de l'air pur et de la lumière directe en abondance, un sol incliné et poreux, de l'eau pure et des reliefs locaux favorables à la constance de la température? J'ai depuis longtemps nommé grands Facteurs de la salubrité : l'*Air*, la *Lumière*, le *Sol*, l'*Eau*, la *Chaleur*. La Science de la salubrité s'emplit et s'ordonne autour de ces cinq titres. Je dirais volontiers qu'elle s'y développe tout entière et que son but est le *rétablissement des Facteurs de Salubrité, là où la nature les a contrariés; et là où, dans l'entraînement des activités sociales, la concurrence des hommes les a supprimés, j'entends dans les agglomérations populeuses des villes*. Mais cela ne serait pas correct. En réalité, ce cadre est devenu insuffisant. Il faut le compléter.

Avec les énormes agglomérations répandues à toutes les latitudes et sous tous les climats, à travers les incessants brassages d'hommes que les rapports internationaux entretiennent, non seulement chaque centre possède ses maladies propres qui se propagent couramment chez lui, mais ces maladies circulent et se transmettent réciproquement de contrées à contrées. On les désigne sous le nom de *maladies transmissibles*. — D'un autre côté, la connaissance des organismes microbiens a décelé dans ce monde infini certains individus porteurs de maladie. Ce sont les *pathogènes*. Chacun de ces microbes est le pathogène d'une maladie spéciale. En sorte que, si l'on pouvait connaître le microbe de chaque maladie, les localités de ses prédilections, ses habitudes, sa manière de progresser,

on pourrait, avec une bonne police médicale, le saisir à point, l'arrêter dans sa progression et l'interdire dans son intervention homicide. La Science a déjà très largement pris pied dans cette tâche sous le nom de *Prophylaxie*.

Bien que la Prophylaxie soit gouvernée par la Médecine, le Salubriste ne peut pas l'ignorer, parce qu'il devra souvent prendre chez elle la consigne de ses applications. Il doit, en conséquence, lui ménager dans son cadre un Chapitre spécial.

La Science de la salubrité est aujourd'hui fortement armée. Elle possède des préceptes précis et clairs. Elle peut diriger avec certitude des applications devenues urgentes au milieu des populations qui s'agglomèrent de plus en plus et qui entretiennent de moins en moins leurs plénitudes. A défaut de naissances, elle peut, en réduisant l'œuvre des maladies, accroître la durée des existences. Les applications lui ménagent malheureusement une multitude d'obstacles qui attardent ses bienfaits : les préjugés qu'on n'éclaire jamais, les intérêts qu'on déplace et qui se cramponnent, l'ignorance qui règne. Tous les progrès sociaux — on le sait — tombent sous cette loi. La salubrité doit la subir.

En parlant, Messieurs, comme je l'ai fait de la salubrité, j'ai montré sa place dans la Science, dessiné son rôle et fixé ses bornes. Son cadre se trouve ainsi bâti. Mais il reste vide. Je devrais faire parler les applications, évoquer les problèmes, décrire les solutions et marquer les résultats. C'est un vaste champ rempli de circonstances variées et de luttes déjà faites pour l'histoire. Je n'y puis songer ici. J'ai déjà excédé les délais, et, je le pressens, fatigué votre attention. Il faut finir.

Je ne le ferai pourtant pas sans ramener un instant devant vos esprits ces organismes infiniment petits, qui ont déjà fourni tant de clarté à mon exposition. Ils occupent dans la Science une place tous les jours grandissante. Il y est démontré que certaines affections transmissibles sont causées par un microbe spécial, qui est le pathogène propre de la maladie. La Médecine en a déjà classé une dizaine et le nombre s'en accroît

tous les jours. Il est vraisemblable, doit-on dire, que toutes les maladies ont leur pathogène et sont de ce fait transmissibles. Mais la Science va bien plus loin dans ses conquêtes. L'étude des pathogènes a appris à les dompter. On peut, en quelque sorte, les domestiquer; et, d'un microbe mortel, on sait faire un *vaccin* qui communiquera préventivement l'immunité. En sorte « qu'un jour la Science s'emparera des virus de toutes les maladies, sur toute la surface de la terre, et les transformera en leur propre vaccin. Et alors, au lieu d'attendre les coups des maladies contagieuses, les populations humaines et les populations animales pourront être prémunies contre elles par des inoculations préalables de leurs virus atténués, devenus préservateurs. »

Quelle conquête que la connaissance des microbes pathogènes! Quelle victoire que la découverte de leur propre vaccin! Et quel bienfait social que l'avènement d'une Médecine exempte d'empirisme! N'êtes-vous pas confondus, Messieurs, par la portée du génie qui a pu gagner de telles batailles de savant?

Maintenant, Messieurs, partout autour et au delà des homicides et rares Pathogènes, considérez, je vous en prie, les innombrables et bienfaisants Saprogènes. Eux aussi, ils sont infiniment petits, infiniment travailleurs, — mais si infinie multitude! — Voyez agir leur monde, inévitable intermédiaire entre les êtres organisés et l'inerte ordonnance des atomes. — Voyez l'immensité de sa tâche :

Par eux, tout reliquat de la vie est destitué des combinaisons anatomiques qui ont servi l'existence. Par eux, au lieu de demeurer immobilisés dans les cadavres, les éléments chimiques sont libérés et rendus à l'atmosphère, aux eaux, aux terres, qui les avaient prêtés à la vie. Par eux, rien ne s'épuise dans les réserves organiques du globe. Les Saprogènes y sont ainsi les conservateurs de l'existence, en même temps que les destructeurs des combinaisons infectieuses qu'elle laisse après elle.

En divulguant aux hommes les Pathogènes, la découverte du monde microbien leur a certainement fourni le pouvoir de

mieux protéger leurs existences. Mais en leur révélant les Saprogènes, elle a prodigieusement éclairé leur champ d'observation et fourni à l'esprit une conception transcendante de la vie sur notre globe. Dans notre France debout et fière, saluons, Messieurs, de toute notre admiration ce grandissement de la pensée humaine, et prosternons notre reconnaissance devant ce grand nom : *Pasteur*.

# LA VIE

ET

# LES TRAVAUX D'OLIVIER [1],

Par M. E. ROUCHÉ.

Né à Lyon le 21 janvier 1793, Théodore OLIVIER fut admis en 1810 à l'École Polytechnique, où sa mauvaise santé le retint pendant quatre années et où il eut l'heureuse fortune de contracter avec son maître, Hachette, une étroite amitié qui fut le culte de sa vie.

Entré, en 1815, à l'École de Metz comme élève sous-lieutenant d'Artillerie, il fut nommé lieutenant en 1818 et resta attaché à l'École d'application, en qualité d'adjoint à l'instituteur des Sciences mathématiques et physiques.

En 1821, il fut autorisé par le Gouvernement à quitter la France pour satisfaire au désir du roi de Suède, qui lui offrait l'occasion de s'essayer dans une création importante ; il s'agissait d'organiser l'enseignement polytechnique à l'École royale de Marienberg. Dans ces nouvelles fonctions, Olivier sut se concilier l'estime et l'amitié de ses élèves, parmi lesquels il faut citer le prince royal.

Pendant les cinq années de son séjour en Suède, Olivier avait longuement réfléchi sur toutes les questions relatives à l'enseignement industriel; aussi, dès son retour en France,

---

[1] Cette Notice, comme celles relatives à l'œuvre de PONCELET, de MORIN, de TRESCA et de FROMENT (pages 1, 97, 103 et 125 du tome VII de la 2e Série des *Annales*), comme celle aussi qui va suivre et qui se rapporte aux travaux de LA GOURNERIE, a été écrite pour le *Livre d'or du Centenaire de l'École Polytechnique* et est insérée ici avec l'assentiment du Comité de publication de cet Ouvrage.

s'unit-il à Dumas et Péclet pour fonder l'École Centrale des Arts et Manufactures, dont l'organisation est assurément son plus beau titre de gloire et à laquelle il resta attaché jusqu'à la fin de ses jours.

Nommé répétiteur à l'École Polytechnique en 1829, puis, dix ans plus tard, professeur au Conservatoire des Arts et Métiers, et enfin administrateur de ce grand établissement, Olivier mourut à la tâche. Le 4 août 1853, il passait à Lyon pour aller demander aux eaux d'Aix le rétablissement de sa santé, lorsque, après une journée de promenade dans sa ville natale, il expira subitement entre les bras de sa compagne dévouée.

Malgré ses occupations si absorbantes et si multiples, Olivier a trouvé le temps de publier de nombreux écrits. Les plus remarquables sont ses *Mémoires sur les engrenages,* ses *Rapports sur les instruments de précision* et enfin son *Traité de Géométrie descriptive,* qui obtint, à l'époque, un succès marqué et qu'il a fait suivre de plusieurs Volumes concernant des *compléments*, des *développements*, des *additions* et des *applications* de cet Art du trait, pour lequel Monge et Hachette lui avaient inspiré une véritable passion.

# LA VIE

ET

# LES TRAVAUX DE LA GOURNERIE,

**Par le Colonel A. LAUSSEDAT.**

Jules-Antoine-René MAILLARD DE LA GOURNERIE est né à Nantes, le 20 décembre 1814. Appartenant à une ancienne famille dont beaucoup de membres avaient servi avec distinction dans l'armée, il s'était d'abord destiné à la profession de marin.

Dirigé par une mère dont l'intelligence était à la hauteur de ses qualités morales, Jules de la Gournerie se présenta, en 1830, aux examens de l'École Navale et fut admis le premier sur la liste.

Sorti du vaisseau-école à la fin de 1831, de la Gournerie fut employé, pendant plus d'une année, au service de correspondance et de transport de troupes qu'exigeait la récente occupation de l'Algérie, entre Toulon et Alger.

Une altercation avec un lieutenant de vaisseau, qui lui avait donné un ordre sur un ton peu convenable, vint brusquement interrompre sa carrière. Traduit, comme le voulait la discipline, devant un conseil de guerre, en décembre 1833, il fut acquitté et maintenu dans son grade.

Mais un pareil début n'était pas fait pour l'encourager; sollicité d'ailleurs par un goût prononcé pour les Mathématiques, il se présenta, en 1833, à l'École Polytechnique où il fut admis le quatrième de sa promotion, après moins d'une année de préparation.

Il en sortit en 1835, dans les Ponts et Chaussées, et, dès son

entrée dans la carrière d'ingénieur, il eut l'heureuse chance de se trouver sous les ordres d'un chef éminent, Léonce Reynaud, qui ne tarda pas à distinguer le mérite de son jeune camarade et même à comprendre qu'il pouvait se reposer sur lui du soin d'achever l'œuvre merveilleuse qu'il avait entreprise aux Héaux de Bréhat, ce phare qui, fondé sur un récif à peine découvert à marée basse, devait atteindre une hauteur de 50$^{m}$, en présentant des formes aussi gracieuses que rassurantes pour l'œil le moins exercé.

Pendant les quatre années que durèrent encore ces travaux délicats et dangereux, la Gournerie donna, à la fois, des preuves d'une vigilance éclairée, en préservant la santé du personnel qui lui était confié, et la mesure de son talent d'ingénieur doublé d'un appareilleur hors ligne, car il fit lui-même toutes les épures, tous les dessins d'exécution d'un monument qui présentait des difficultés de construction peu ordinaires, avec les courbes savantes de son élégant profil.

Après ce coup d'essai, la Gournerie pouvait être employé partout, mais son inclination naturelle le portait toujours à rechercher les travaux maritimes. C'est ainsi qu'il prit part à la construction de la grande jetée du Croisic et qu'aussitôt après il contribua, plus que personne, à la création du bassin à flot qui a fait de Saint-Nazaire l'un des meilleurs ports de l'Europe.

Au Croisic, pour effectuer l'extraction des roches qui obstruaient le chenal, la Gournerie, s'inspirant d'une idée de Coulomb qui n'avait pas encore été appliquée, employa une sorte de bateau sous-marin qui l'aida à triompher de difficultés jugées presque insurmontables.

A Saint-Nazaire, les qualités de la Gournerie devaient subir la plus rude épreuve, car il eut à lutter à la fois avec les éléments et avec des préjugés d'autant plus dangereux qu'ils étaient enracinés dans l'esprit d'un homme qui avait fait ses preuves et avait bien plus d'autorité qu'un débutant placé sous ses ordres.

Jamais peut-être un simple ingénieur ne montra plus de sûreté de jugement et de fermeté de caractère. Pressentant l'insuccès du projet de son ingénieur en chef, insuccès qui eût enrayé pour longtemps l'avenir de Saint-Nazaire, au risque de

compromettre sa carrière il refusa pendant cinq ans de s'y associer et fit un contre-projet qu'il eut la satisfaction de voir soutenir et développer par son nouveau chef, M. Jégou d'Herbeline, et adopter par le Conseil des Ponts et Chaussées. On le chargea de l'exécuter et, lorsque, en 1850, il quitta ce service pour occuper la chaire de Géométrie descriptive de l'École Polytechnique, à laquelle il venait d'être appelé sur la recommandation éloquente de Léonce Reynaud, les travaux étaient assez avancés pour que l'on pût considérer la création du port de Saint-Nazaire comme assurée.

Sa carrière d'ingénieur était terminée, et, bien qu'elle eût été courte, on doit reconnaître qu'elle n'avait pas moins été très brillante.

Les travaux scientifiques auxquels il se livra, autant par goût que pour répondre à la confiance qu'on lui témoignait, les services qu'il a rendus à l'enseignement, à l'École Polytechnique depuis 1850 et au Conservatoire des Arts et Métiers depuis 1854, quoique d'un autre ordre, lui firent tout autant d'honneur.

L'œuvre de la Gournerie, comme géomètre, a été appréciée avec une grande faveur par les juges les plus autorisés. En Angleterre M. Cayley, en France Poncelet, Chasles et M. J. Bertrand se sont plu à signaler l'originalité de la plupart de ses Mémoires de Géométrie pure.

Dans son double enseignement, à l'École Polytechnique comme au Conservatoire, il s'est beaucoup moins préoccupé de faire montre de sa science que de mettre ses auditeurs à même de résoudre sûrement les problèmes, d'ailleurs si délicats, qui se présentent dans l'art des constructions, dans les arts graphiques et jusque dans la décoration théâtrale. Ses Mémoires sur les arches biaises, si remarqués et si utiles aux ingénieurs de chemins de fer, son *Traité de Géométrie descriptive* et son *Traité de Perspective* sont les monuments d'une longue et patiente étude critique de méthodes plus anciennes qu'on ne le croyait généralement et des applications si variées, si intéressantes d'une science qui a été cultivée avec un grand succès par plusieurs géomètres français éminents, dans le même temps que nos admirables architectes, nos maîtres

tailleurs de pierre et nos maîtres charpentiers parvenaient, à force d'art et de science, à surmonter habilement les difficultés nées de conceptions monumentales hardies ou gracieuses.

L'École Polytechnique a eu l'heureux privilège de voir la Géométrie descriptive prendre chez elle toute l'importance qu'elle méritait, grâce à l'influence de Monge qui lui a même donné le nom qu'elle porte. De la Gournerie a eu le mérite incontestable de remonter plus haut et de renouer des traditions que notre nouvelle organisation sociale court le risque de compromettre. Ses leçons au Conservatoire des Arts et Métiers ont certainement contribué à les entretenir et l'on pourrait dire à les mieux diriger chez nos ouvriers et chez nos artistes.

On sait que ses excellents préceptes ont été heureusement introduits par plusieurs de ses auditeurs dans les chantiers, et les explications qu'il a données des dérogations aux règles étroites de la Perspective linéaire par les plus grands peintres, qui ont employé de préférence des tracés intuitifs beaucoup plus satisfaisants pour le spectateur, ont été très goûtées de ceux qui sont le plus intéressés à bien s'en rendre compte.

« Ses persévérantes études, dit M. J. Bertrand [1], appréciées et mises, chaque année, à profit par les professeurs de l'École des Beaux-Arts, forment peut-être la partie la plus originale de son œuvre et la plus digne de conserver, dans l'histoire de la Science, le souvenir d'une carrière si bien remplie. ».

Ayant déjà quitté à l'École Polytechnique sa chaire de Géométrie descriptive pour devenir examinateur des élèves, parce qu'il avait été atteint prématurément d'un asthme très fatigant, de la Gournerie songeait à la retraite, dès 1873, quand l'Académie des Sciences l'appela dans son sein en qualité de membre libre. Très sensible à ce témoignage d'estime qu'il avait à peine sollicité, l'infatigable travailleur, pour répondre à la confiance de ses nouveaux confrères, se remit à l'œuvre et entreprit, notam-

---

[1] J. BERTRAND, *Discours prononce aux funérailles de M. de la Gournerie,* le vendredi 29 juin 1883.

ment sur les travaux de l'illustre Bouguer, une étude qu'il a laissée malheureusement inachevée, mais dont les parties qu'il a publiées présentent un grand intérêt historique et témoignent autant de son énergique volonté à découvrir la vérité que de son érudition, de sa sagacité et de son ardent patriotisme.

Cet éminent esprit appartenait, en effet, à la race, heureusement encore assez nombreuse en France, qui prise plus haut le bien public et l'honneur du pays que les avantages matériels de positions plus ou moins brillantes.

Il nous serait aisé de fournir des preuves multipliées de l'élévation de caractère de cet homme de bien. Nous nous bornerons à donner l'extrait suivant de la Notice autobiographique préparée pour ses enfants, qu'il nous a communiquée lui-même quelques jours avant sa mort, dont il s'entretenait avec une sérénité admirable :

« Mes enfants viennent de voir que mon frère Paul et mon neveu Antoine ont été tués, les armes à la main, l'un en Kabylie, l'autre à Broué (armée de la Loire). Je ne dois pas leur laisser ignorer que M. Baudry-Duplessis, fils de la seconde sœur de mon père et capitaine d'infanterie, a été tué, le 19 février 1814, à Montereau. Il suit de là et de ce que j'ai dit de la part prise par ma famille aux guerres de la Vendée, que onze de mes parents, dont les plus éloignés sont cousins-germains de mon père ou de ma mère, sont morts glorieusement à l'armée par le feu. »

Tout commentaire serait superflu, mais nous devons ajouter que les leçons d'abnégation et d'héroïsme que de la Gournerie donnait à ses enfants étaient un héritage qu'il avait reçu lui-même de sa vénérée mère, laquelle, encore très jeune, au plus fort de la tourmente révolutionnaire et de la guerre civile, avait été un modèle de grandeur d'âme et de dévouement.

De la Gournerie avait un titre nobiliaire ([1]), qu'il n'affichait guère et dont il eût eu cependant le droit de s'enorgueillir, sa famille s'étant, de très ancienne date, distinguée par ses ser-

([1]) Il était vicomte.

vices; mais, bien que fort attaché aux croyances et aux opinions de sa race, il n'avait aucune morgue et était bien convaincu que les qualités et le mérite individuels valent autant que tous les parchemins. Ses amitiés, ses préférences à l'École Polytechnique et, plus tard, dans le monde, témoignaient de cette indépendance de son esprit, ouvert à tout ce qui était élevé et, par conséquent aussi, véritablement noble.

Il serait, croyons-nous, difficile de trouver, réunies chez la même personne, un ensemble de qualités plus brillantes et plus solides à la fois que celles que nous venons de rencontrer chez ce savant de grand mérite, qui fut un homme d'un grand caractère.

# LES APPLICATIONS

DE

# L'ÉLECTROLYSE

## A LA MÉTALLURGIE,

**Par M. U. LE VERRIER,**
Ingénieur en Chef des Mines.

## INTRODUCTION.

Les applications de l'électrolyse à la Métallurgie peuvent se rattacher à quatre types de procédés différents :

1° La fabrication des dépôts galvanoplastiques;

2° L'affinage des métaux;

3° Le traitement des minerais ou des produits intermédiaires, comme les mattes;

4° L'électrolyse par voie ignée, où l'on opère sur des sels fondus.

1. Les procédés galvanoplastiques sont caractérisés par ce fait que l'on prend comme matière première des métaux purs; le courant n'effectue que le transport du métal. Par exemple, s'il s'agit de cuivrer une pièce en fer, cette pièce reliée au pôle négatif formera cathode, une plaque de cuivre reliée au pôle positif sera l'anode; comme bain, on emploiera une dissolution de sulfate de cuivre. A mesure que cette dissolution se dissocie par le courant et dépose du cuivre à la cathode, elle en reprend à l'anode où l'acide mis en liberté attaque le métal. Le liquide, ou électrolyte, ne sert que de

véhicule; il ne s'altère pas et l'opération peut se continuer toujours dans les mêmes conditions.

Ces procédés sont entrés depuis longtemps dans la pratique courante de l'industrie; ils peuvent s'appliquer à tous les métaux. On les emploie surtout pour le nickelage, l'argenture, le cuivrage et la dorure; depuis peu on commence à les employer pour la galvanisation du fer, par dépôt de zinc.

**2.** Les procédés d'affinage diffèrent des précédents par l'emploi, comme anodes, de métaux bruts plus ou moins impurs. Si l'électrolyte est de composition convenable et la densité du courant bien graduée, le métal qui se dépose à la cathode peut rester très pur. En effet, les corps étrangers qui s'y trouvent associés peuvent se diviser en deux catégories; les uns sont moins solubles dans le liquide employé que ne l'est le métal principal; ils pourront rester à l'anode sous forme de boues. Les autres sont plus faciles à dissoudre, mais aussi plus difficiles à précipiter; ceux-là passeront dans la liqueur et pourront y rester sous forme de sels, non décomposés par le courant.

Toutefois les conditions de marche ne resteront plus constantes comme dans la galvanoplastie. La composition de l'anode et de la liqueur se modifie progressivement : il se développe des réactions accessoires qui augmentent la force électromotrice nécessaire. A mesure que l'électrolyte se charge de corps étrangers, ils ont plus de tendance à se déposer sur la cathode, et il devient plus difficile d'obtenir un produit pur. Ces difficultés augmentent avec l'impureté de la matière première. L'opération est du reste très lente, inconvénient grave pour la grande industrie.

L'affinage électrolytique du cuivre s'emploie depuis une quinzaine d'années environ, et a pris une grande importance; il offre l'avantage de donner un cuivre exceptionnellement pur, recherché pour les applications électriques et pour certaines fabrications spéciales; d'ailleurs, les dépenses sont en partie couvertes par la récupération de l'or et de l'argent qui se trouvent dans certains cuivres et qu'on ne pouvait en extraire par les autres procédés.

Les nombreux essais tentés sur d'autres métaux n'ont pas eu, en général, de suites industrielles. Cependant on emploie quelquefois l'électrolyse pour affiner le nickel, pour séparer ce métal du cuivre dans les produits extraits des minerais complexes, comme ceux du Canada, et aussi pour traiter certains alliages des métaux précieux.

3. Quand il s'agit d'extraire les métaux de leurs minerais ou de produits intermédiaires plus ou moins riches, on a à faire à des matières premières bien plus complexes, et les difficultés que nous venons de signaler se présentent d'une manière bien plus grave. En outre, on est amené, le plus souvent, à employer des anodes insolubles, qui ne servent qu'à transmettre le courant sans être attaqués par l'électrolyte. La force nécessaire devient alors plus grande, car l'énergie absorbée pour la décomposition des sels n'est plus compensée par celle que produisait la dissolution de l'anode.

Malgré les nombreuses tentatives faites dans cette voie, le traitement des minerais par l'électrolyse n'a encore reçu aucune application industrielle définitive, sauf peut-être pour les minerais d'or, où il s'agit du métal le plus facile à précipiter électriquement. Néanmoins la question est toujours à l'étude, par suite de l'intérêt qu'elle présenterait pour un grand nombre de mines situées dans des régions dépourvues de combustibles ou possédant des minerais difficiles à traiter par les procédés ordinaires.

4. L'électrolyse des sels fondus, surtout des fluorures ou des chlorures, est employée pour la fabrication de l'aluminium, du magnésium et des métaux alcalins. Son usage est justifié ici parce qu'il n'existe pas d'autre moyen pratique d'extraire ces métaux, dont les combinaisons chimiques sont très stables et dont les oxydes ne se réduisent pas par le charbon.

Nous laisserons de côté ces derniers procédés et nous nous bornerons à étudier ceux dans lesquels on électrolyse des dissolutions aqueuses. Nous ne parlerons pas non plus des procédés galvanoplastiques connus depuis longtemps, et nous n'examinerons que les essais relativement nouveaux. Je com-

mencerai par décrire avec quelques détails l'affinage du cuivre, qui est l'application industrielle la plus importante, la mieux connue, et dont l'étude aide à bien comprendre les difficultés que l'on rencontre dans toutes les opérations électrolytiques. Je mentionnerai plus sommairement les autres procédés d'affinage ou d'extraction qui sont, à ma connaissance, pratiqués aujourd'hui, et ceux qui ont fait l'objet d'essais industriels plus ou moins heureux. Enfin, parmi les innombrables procédés qui ont été proposés sans avoir donné lieu à des essais en grand, je signalerai surtout les plus récents, ceux qui se rapportent à des questions d'un intérêt actuel, comme les essais de dépôt ou d'extraction du zinc.

---

## AFFINAGE DU CUIVRE.

L'affinage électrolytique du cuivre a pris une grande importance industrielle. Il permet d'obtenir un métal très pur, recherché pour sa conductibilité électrique ; il est, en outre, le moyen le plus pratique de séparer les petites quantités d'argent et d'or alliées souvent au cuivre.

### DESCRIPTION DU PROCÉDÉ.

Si l'on fait passer le courant électrique dans une dissolution de sulfate de cuivre, en prenant comme anode une plaque de cuivre brut, comme cathode une feuille de cuivre pur, le sel commence à se décomposer, mais l'anode s'attaque peu à peu par l'acide mis en liberté, de manière à maintenir toujours le sulfate saturé. Ce liquide ne sert donc que de véhicule, le cuivre se transporte à la cathode et s'y dépose à l'état de pureté presque parfaite.

Parmi les corps étrangers que peuvent contenir les anodes, les uns sont insolubles dans l'acide sulfurique et tombent en boues au fond du bain, les autres sont solubles et passent dans les liquides ; mais ils forment des sulfates plus stables

que le cuivre et se déposent moins facilement sous l'influence d'un courant modéré. Pour les premiers, la séparation est rigoureuse; pour les seconds, elle n'est satisfaisante que si ces corps étrangers sont en quantité relativement faible. L'ordre de précipitation dans un liquide complexe n'est pas absolu, et l'abondance relative des éléments peut l'influencer : le cuivre précipité n'est tout à fait pur que si le bain est beaucoup plus riche en cuivre qu'en autres métaux. Il n'est donc possible d'affiner avec un succès complet que des cuivres déjà relativement purs.

*Rôle des corps étrangers.* — Les métaux insolubles sont l'argent, le platine et l'or, qui se retrouvent à l'état libre dans les boues. Le bismuth et le plomb s'attaquent, mais se précipitent à l'état de sulfates basiques; ils offrent donc l'inconvénient d'absorber de l'acide sulfurique, de neutraliser la liqueur et de ralentir la dissolution du cuivre. L'étain se comporte de la même manière; mais, d'après Kiliani, sa présence exercerait une influence heureuse sur la qualité du cuivre déposé.

Les corps solubles sont le fer, le nickel, le cobalt, le zinc, l'arsenic. Ils passent entièrement dans le bain dont la composition s'altère peu à peu, et ils ralentissent l'attaque du cuivre; mais ils ne se déposent pas à la cathode tant qu'ils sont en quantité limitée et que la liqueur reste acide.

L'antimoine est en partie soluble et en partie insoluble sous forme de sulfate basique. Ce corps est, avec l'arsenic et l'étain, un des premiers qui se précipitent en partie à la cathode et nuisent à la qualité du cuivre, lorsque la liqueur devient neutre. Toutefois l'étain provoquerait la précipitation de l'arsenic sous forme de sels complexes, et l'on a proposé d'en ajouter aux anodes pour traiter des cuivres arsenicaux.

*Force nécessaire.* — La présence des diverses impuretés augmente le potentiel nécessaire : la tension entre les deux électrodes, qui reste inférieure à $\frac{1}{10}$ de volt quand on traite du cuivre pur, monte à $\frac{2}{10}$ ou $\frac{3}{10}$ quand on traite du cuivre brut, à $\frac{4}{10}$ ou $\frac{5}{10}$ avec des mattes. Elle peut atteindre des valeurs doubles quand la solution devient neutre et, par suite, moins

conductrice, surtout si cette solution reste immobile : dans ce cas, la tension peut dépasser $1^{volt},5$.

Le poids du métal précipité est de $1^{gr},18$ par ampère et par heure, ce qui donne une couche de $\frac{12}{10000}$ de millimètre par ampère-heure passant à travers chaque mètre carré de surface d'anode. On pourrait calculer l'énergie électrique nécessaire pour déposer un poids donné. Elle est exprimée par le produit du nombre de volts par le nombre d'ampères. Le travail moteur réel dépend essentiellement du régime électrique et du rendement.

D'après le Dr Elbs, s'il faut 13 chevaux pour déposer une tonne par jour en partant d'un cuivre presque pur à 99,6 pour 100, il en faut 22 avec un métal à 98, 40 avec un cuivre brut à 95, et 66 avec un cuivre impur à 90. Ces chiffres ont été observés avec un courant de 20 ampères par mètre carré de surface d'anodes, lequel met cinq mois à former un dépôt de $10^{mm}$ d'épaisseur. Ils correspondent à peu près au minimum de travail moteur qu'on peut dépenser pratiquement. Si l'on emploie des courants plus intenses, la rapidité du dépôt croît proportionnellement au nombre d'ampères, mais la force nécessaire croît aussi, et en général dans des proportions plus grandes.

*Difficulté de traiter des cuivres impurs.* — D'après ce que nous venons de dire, le traitement des cuivres impurs exige plus de force, les liqueurs s'altèrent rapidement et doivent être souvent remplacées; il est, en outre, difficile d'obtenir à la cathode du cuivre tout à fait pur.

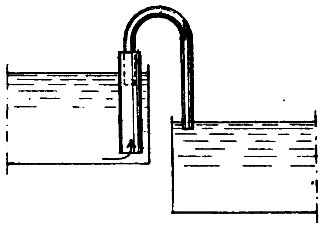
Pour combattre ces inconvénients, il faut maintenir la liqueur bien acide, la faire circuler vivement et l'aérer.

*Composition de l'électrolyte.* — Les dissolutions généralement employées contiennent 15 à 20 pour 100 de sulfate, et 5 à 6 pour 100 d'acide libre. Elles marquent de 16 à 18° Baumé; la densité est de 1,12 à 1,15. Plus elles sont chargées, plus elles ont de conductibilité; cependant il faut éviter qu'elles ne cristallisent. La présence de l'acide sulfurique favorise la pureté du dépôt, mais, en trop grand excès, il retarderait la précipitation du cuivre et augmenterait l'énergie nécessaire.

La liqueur doit rester homogène, de composition constante et uniforme; d'où la nécessité de la maintenir en mouvement.

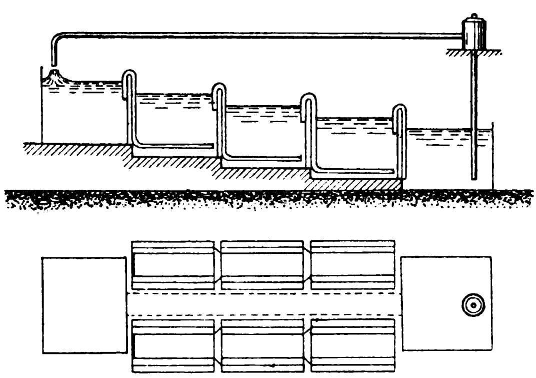
*Circulation du liquide.* — Pour assurer la circulation, les bains sont disposés en étages, et des siphons transvasent d'une manière continue le liquide de l'un dans l'autre; il est repris en bas par des pompes qui le reversent à l'étage supérieur.

Fig. 1.



Les siphons peuvent puiser le liquide au bas des cuves, si l'on entoure leur orifice d'un cylindre plongeant (*fig.* 1), et le distribuer en haut de la cuve suivante. Il vaut peut-être mieux distribuer le liquide sous toutes les cellules par un tuyau per-

Fig. 2.



foré parcourant toute la longueur du bain (*fig.* 2). Il faut faire passer dans les bacs une vingtaine de litres par minute.

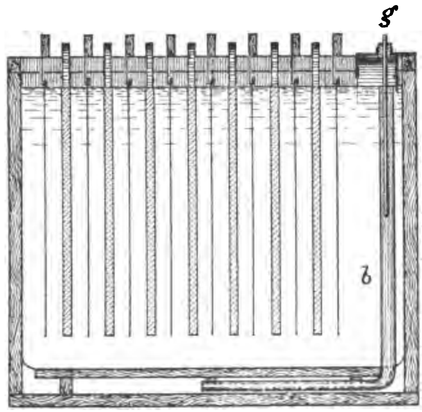
Les monte-jus fonctionnant par l'air comprimé ou par le

vide sont peut-être le meilleur système; les pompes en plomb demandent de fréquentes réparations, les injecteurs introduisent trop d'eau dans la solution.

*Ventilation.* — L'aération facilite l'attaque du cuivre; elle provoque aussi la précipitation des sulfates basiques et même d'une partie du fer qui se peroxyde. Dans les installations du système Thofern, la liqueur, avant d'être reversée dans les bains, passe en nappe mince devant un jet d'air puissant. De plus, on oxyde les anodes. Le cuivre est moulé en plaques après avoir été fondu dans un réverbère muni d'un appel d'air près de l'autel.

L'injection de l'air dans les bacs est peut-être le meilleur moyen de conserver la liqueur en bon état. Mais elle détermine une agitation trop forte et maintient les précipités en suspension. Borchers indique un appareil propre à éviter cet inconvénient (*fig.* 3). L'air n'est pas envoyé directement

Fig. 3.




dans le bain, mais dans un tuyau recourbé, ouvert aux deux bouts, s'élevant du fond jusqu'à la surface. Dans ce tuyau (*b*) pénètre un tube en verre (*g*), terminé en pointe, par où se fait l'insufflation. Les bulles d'air se mélangent au liquide, et il en résulte une sorte d'émulsion, qui remplit le tuyau. Cette co-

lonne de mousse légère tend à remonter et va se répandre à la surface tandis qu'elle est remplacée à la base par de la solution non aérée. On arrive donc à ventiler le bain sans l'agiter, en même temps qu'on y provoque une circulation continue.

*Densité du courant.* — La densité du courant, c'est-à-dire le nombre d'ampères qu'on peut faire passer par unité de surface des anodes, est limitée par plusieurs considérations. Elle dépend d'abord de la facilité d'attaque des anodes, car la dissolution doit marcher aussi vite que la précipitation, sans quoi la liqueur s'appauvrirait. Les anodes s'attaquent plus facilement quand elles ne sont pas trop compactes. Il vaut mieux employer des plaques coulées en coquille et rapidement refroidies que des plaques laminées. Le cuivre un peu oxydé s'attaque aussi plus vite.

La densité du courant a une influence notable sur la pureté du dépôt. Un courant trop fort dépose trop facilement les métaux étrangers; un courant trop faible donne à la cathode du cuivre oxydé. La densité pourra être d'autant plus forte que la matière première sera moins impure.

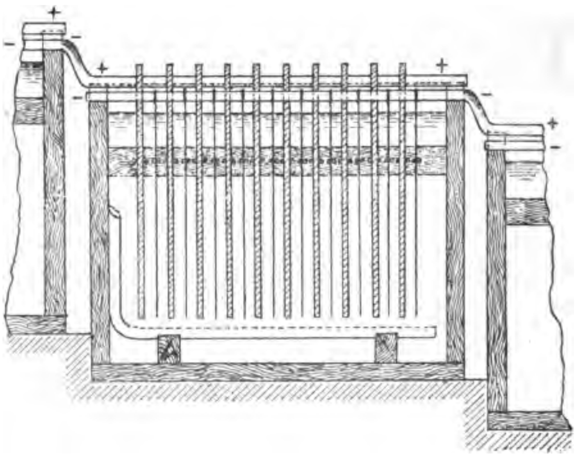
Il ne faut pas dépasser une certaine densité pour avoir des dépôts tenaces et cohérents. D'après M. Sprague, on obtiendrait encore de bons dépôts avec 300 ampères par mètre carré, ce qui correspond à un accroissement d'épaisseur de $\frac{36}{1000}$ de millimètre par heure. Mais ces expériences étaient faites avec du cuivre pur. Dans la pratique, on emploie des courants moins intenses. Dans la plupart des affineries montées au début en Europe, le régime variait entre 20 et 40 ampères par mètre carré. On dépasse généralement ces chiffres dans les installations plus récentes. Aux États-Unis, on marche souvent à 80 ou 100 ampères par mètre carré.

Au point de vue économique, il y a en général avantage à augmenter la densité du courant, bien qu'on accroisse ainsi la dépense de force motrice.

*Disposition des électrodes.* — Dans la disposition la plus usuelle, les anodes et les cathodes sont réunies en quantités; on les suspend à deux conducteurs qui longent la cuve d'un

bout à l'autre. Le courant est amené par l'un de ces conducteurs à toutes les anodes à la fois, traverse le bain pour gagner les cathodes correspondantes et sortir par l'autre conducteur. Chaque anode est placée entre deux cathodes et réciproquement. Les différentes cellules forment donc comme un seul couple où la surface des électrodes serait égale à la surface totale des plaques associées, en comptant les deux faces qui travaillent également. Plusieurs bains analogues sont pla-

Fig. 4.



cés à la suite les uns des autres en tension, et le conducteur négatif d'un bain devient positif pour la cuve suivante (*fig.* 4).

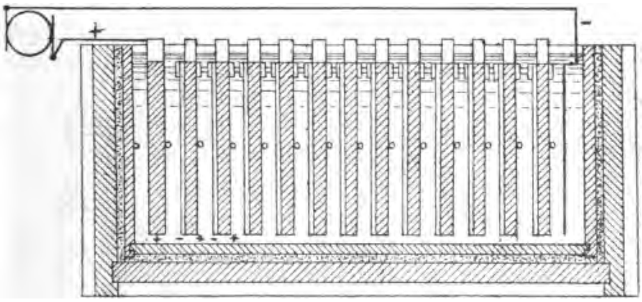
C'est ce qu'on appelle en Amérique le *multiple process.*

Dans d'autres installations, dont le premier type a été le procédé Hayden, et qu'on désigne en Amérique sous le nom de *series-system,* les plaques sont toutes isolées, sauf celles des deux extrémités : le courant entrant par un bout de la cuve, sort de l'autre côté après avoir traversé normalement toutes les plaques sur son passage (*fig.* 5). Chaque plaque joue donc le rôle de cathode par une face et d'anode par l'autre; elle se ronge du côté où sort le courant et se nourrit du côté opposé par le dépôt du cuivre pur.

On admettait que le système diminuerait la quantité de

cuivre immobilisée pour les plaques et les conducteurs; on en économiserait environ le tiers. Mais cette économie est illusoire; en effet, les plaques n'agissent plus que par une face; pour conserver la même surface active, il en faut deux fois plus. On les fait plus minces et on les rapproche davantage, mais on est obligé alors d'employer des plaques laminées et du cuivre plus pur. Ce système présenterait d'autres avantages théoriques : on est sûr que l'intensité du courant sera la même dans toutes les cellules, et qu'il sera uniformément

Fig. 5



réparti sur la section des plaques; un court circuit local n'intéresse qu'une cellule, au lieu de troubler la marche de toute une cuve; les anodes, soutenues par la cathode qui y adhère, peuvent tenir plus longtemps malgré leur désagrégation.

En revanche, le courant a peut-être plus de tendance à se dériver par les parois des cuves; une partie de l'électricité est perdue, traversant la colonne liquide sur le pourtour sans rencontrer les plaques; pour en diminuer la proportion, il faudrait rétrécir l'espace libre autour des électrodes, et, dans ce cas, la circulation du liquide est entravée, les dérivations, les courts circuits par le contact des schlamms ont plus de chances de se produire. On supprime les garnitures en plomb pour éviter les dérivations; mais le bois, pénétré par le liquide, devient conducteur, et, en somme, au bout d'un certain temps, l'utilisation du courant dans les bacs dépasse rarement 85 pour 100, alors qu'elle atteint 95 pour 100 dans les raffineries bien conduites du multiple système.

Les bois influencés par les courants s'usent vite; ils ne durent pas plus de quatre ans. Le travail pour séparer le dépôt cuivreux des résidus d'anodes est difficile, et la séparation n'est pas toujours complète.

On a employé tantôt des plaques uniques, garnies à la face antérieure de paraffine, pour éviter l'adhérence, tantôt des plaques doubles comprenant une cathode et une anode réunies par des boulons de cuivre et comprenant entre elles une plaque isolante (amiante ou verre). Cette disposition, due à Stædmann, a été abandonnée.

En définitive, le series-system, tout en procurant une économie sur les frais de première installation, est plus coûteux comme prix de revient, et semble perdre du terrain en Amérique où plusieurs usines l'avaient adopté. Il a été abandonné aux usines d'Anaconda, après des essais prolongés.

Je rappellerai pour mémoire qu'on avait proposé de monter les électrodes en piles verticales de plaques couchées et superposées, séparées par des tasseaux. Cette disposition provoque les courts circuits par l'accumulation des boues dans les cellules; on ne peut du reste remédier au mal, ni observer l'état de l'appareil sans tout démonter. Les dispositifs de ce genre sont donc absolument à rejeter.

*Distance des électrodes.* — Il y a intérêt à rapprocher le plus possible les électrodes pour diminuer la résistance électrique et par suite le travail perdu. Mais on ne peut dépasser une certaine limite, sans quoi les boues qui se détachent de l'anode pourraient, dans leur chute, s'accrocher aux cathodes et se mélanger au dépôt de cuivre. Avec des anodes en cuivre presque pur, on peut réduire la distance à $3^{cm}$; quand on traite des cuivres bruts de mauvaise qualité, il faut la porter à $7^{cm}$; le plus souvent elle est de $4^{cm}$ à $5^{cm}$.

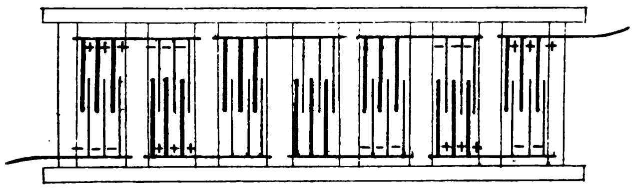
La distance doit être maintenue par de petits tasseaux en bois, fixés à des longrines, et faisant saillie entre deux plaques contiguës.

*Construction des bacs.* — Les bacs sont en bois, doublé d'une feuille de plomb. Parfois on emploie une double paroi

en bois, avec couche d'asphalte ou d'autres matières étanches entre les deux épaisseurs. Les électrodes reposent, en général, sur deux paires de tiges en cuivre, placées le long du bain, à des niveaux différents (*fig.* 4).

Les *fig.* 6, 7 et 8 représentent, d'après Borchers, l'installa-

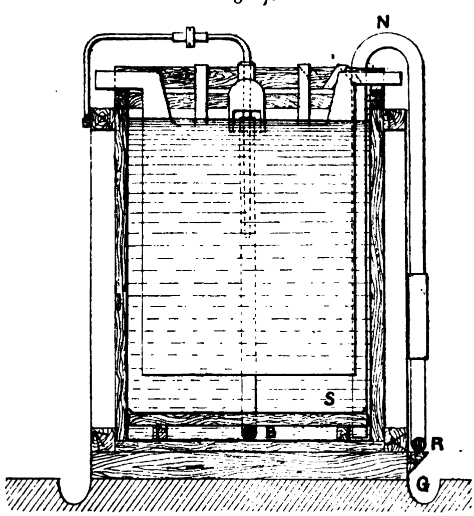
Fig. 6.



tion des bains à l'affinerie de Goslar, qui paraît simple et rationnelle.

Les conducteurs sont des barres plates, reposant sur les

Fig. 7.

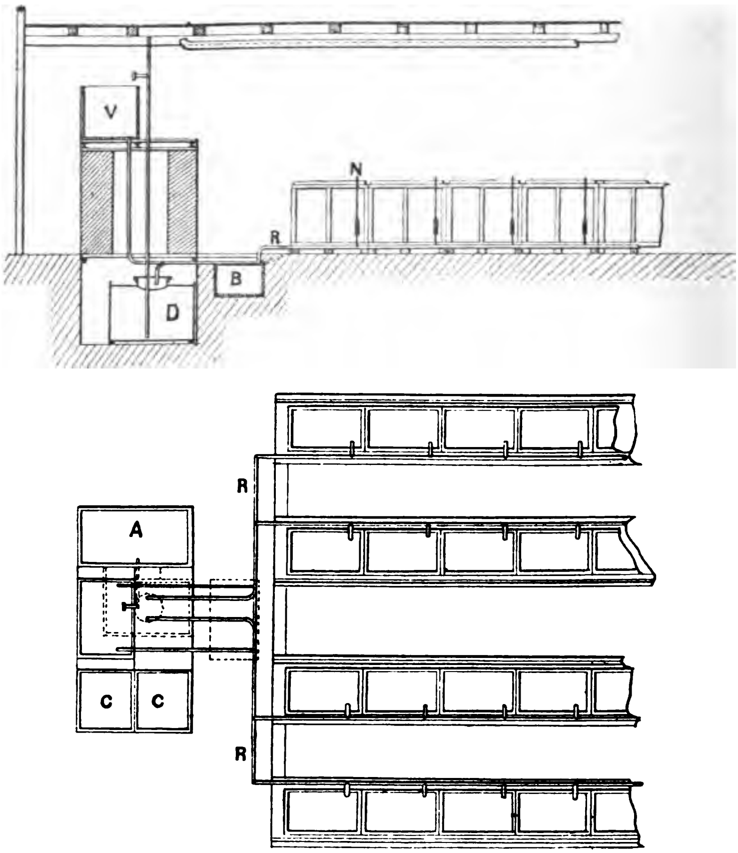



bords du bac et isolées par des supports en bois goudronnés. Les électrodes reposent dessus au moyen de pattes. Pour les isoler d'un des conducteurs, on place entre deux une plaque

d'ébonite. Le même conducteur communique avec les cathodes d'un bain et les anodes du suivant, de manière que le courant chimique se fait en zigzag à travers la série des bains comme l'indique la *fig*. 6.

Au fond des bacs se trouve une feuille de plomb recourbée S, formant cuvette pour recueillir les boues. Sous cette cuvette

Fig. 8.




passe le tube ventilateur B, déjà décrit (*fig*. 7). La circulation qu'il provoque suffit pour brasser la liqueur, et on ne la fait pas passer d'un bain à l'autre. Chaque bac peut être rempli ou

vidé par un siphon N communiquant avec une conduite générale R. Il suffit pour cela de mettre cette conduite en relation par des robinets, soit avec le réservoir supérieur V qui distribue la solution, soit avec la caisse inférieure A, qui l'emmagasine. De A la liqueur tombe en D, dans un réservoir souterrain d'où l'air comprimé la remonte en V. Les rigoles G recueillent les infiltrations et les pertes, et conduisent le liquide dans le réservoir B. Les caisses C sont destinées au lavage des boues (*fig.* 8).

*Chauffage des bains.* — On maintient, en général, dans les affineries la température de l'atelier entre 16° et 20°. Siemens et Halske conseillent de chauffer les liqueurs, ce qui active la précipitation des combinaisons d'antimoine et de bismuth, et permet de marcher plus vite sans avoir à régénérer si souvent la liqueur. D'ailleurs, l'élévation de température réduit la résistance. D'après Kohlrausch, la diminution de résistance pour les dissolutions de sulfate de cuivre est d'environ 2 pour 100 par degré. On diminue aussi la résistance en augmentant la concentration des liqueurs et leur acidité; les bains ordinaires contiennent de 15 à 20 pour 100 de sulfate, et 5 à 6 pour 100 d'acide sulfurique.

*Travail courant.* — Deux hommes peuvent changer par jour une vingtaine d'anodes et autant de cathodes. Deux équipes semblables peuvent faire le travail dans une usine produisant trois tonnes par jour. Les électrodes sont renouvelées à des intervalles qui peuvent varier de un mois à trois mois, suivant l'intensité du régime. Un courant de 80 ampères par mètre carré donne un dépôt de $\frac{1}{4}$ de millimètre par jour : il faudra donc quarante jours pour déposer $10^{mm}$, soit la quantité de cuivre contenue dans une anode, qui se ronge des deux côtés à la fois; on est, du reste, obligé d'arrêter avant la dissolution complète, parce que l'anode se désagrège. Il est bon de changer les cathodes plus souvent que les anodes, afin de diminuer les conséquences d'une répartition irrégulière du courant et les chances de courts circuits. En effet, les inégalités du dépôt tendent à s'accentuer rapidement sur une

même cathode, car la plus légère saillie amène une diminution locale de la résistance et une croissance plus rapide de la couche; au bout de peu de temps, il se développe des espèces de champignons qui rejoignent les deux plaques.

*Fabrication des électrodes.* — Les anodes ont $15^{mm}$ à $20^{mm}$ d'épaisseur; on les fait le plus souvent avec du cuivre fondu au réverbère et coulé dans des moules. En Amérique, certaines usines emploient le cuivre brut (à 98 pour 100) coulé directement du convertisseur où l'on traite les mattes. Des pattes venues de fonte aux deux angles supérieurs permettent de les appuyer sur les conducteurs. Les cathodes ont au plus $1^{mm}$ d'épaisseur, et parfois seulement $\frac{2}{10}$. Elles sont faites en cuivre pur laminé, ou en cuivre électrolytique; on les fabrique alors dans des bacs spéciaux un peu plus élevés que les autres. Le mode d'attache le plus simple est, en effet, de donner à la feuille un excès de longueur, et de replier le bord supérieur pour le poser sur une tige de cuivre transversale. La fabrication des anodes peut représenter une dépense de $10^{fr}$ à $15^{fr}$ par tonne de cuivre déposé; celle des cathodes, $5^{fr}$ à $7^{fr}$. On compose parfois l'anode de deux ou plusieurs plaques pour la rendre plus maniable; il vaut mieux employer des plaques uniques et faciliter les manœuvres en établissant sur la ligne des bacs un rail aérien où circulent des palans (*fig.* 8).

Les cathodes peuvent être enduites de graphite ou de paraffine pour empêcher l'adhérence et permettre de détacher les plaques déposées.

*Surveillance.* — Une condition essentielle de succès, comme dans toutes les opérations d'électrolyse, est d'exercer une surveillance constante et d'entretenir toutes les parties de l'installation électrique dans un état de propreté parfait. Le courant est contrôlé d'une manière continue par un ampèremètre et un voltmètre; d'autres voltmètres sont disposés en dérivation sur chaque bac; on peut aussi y monter des lampes dont l'éclat fera juger des variations de potentiel. Lorsque la différence de potentiel diminue dans un bac, c'est qu'il y a un

court circuit; un voltmètre portatif, placé successivement sur chaque couple d'électrodes, permettra de le localiser. Si la tension augmente, c'est qu'il y a une résistance anormale : elle peut provenir de mauvais contacts ou de dépôts non conducteurs sur les anodes, il faut alors les retirer et les nettoyer. Quand la surveillance est insuffisante, ces résistances peuvent se manifester par un échauffement du bain qui va parfois jusqu'à faire fondre la paraffine.

*Régénération de la liqueur.* — Lorsque le liquide s'est chargé d'arsenic, d'antimoine ou de bismuth, on peut le purifier en le filtrant à travers une couche d'oxyde de cuivre, ou de cuivre grillé granulé. La solution se neutralise, et l'on peut achever la purification en la faisant passer sur de l'oxyde de fer fraîchement précipité. On la débarrassera en partie du fer en l'abandonnant longtemps à l'air ou en y insufflant de l'air comprimé, qui précipitera du sulfate basique de sesquioxyde. Quand elle est trop altérée, on doit la remplacer; on peut en extraire du cuivre impur en employant des anodes insolubles (en plomb ou en carbone); on peut aussi la concentrer et faire cristalliser le sulfate de cuivre, qu'on redissout avec un peu d'eau froide pour le séparer de l'acide arsénieux déposé en même temps.

*Traitement des boues.* — Les boues, de composition très variable, contiennent de 5 à 45 pour 100 d'argent, 80 à 95 pour 100 de cuivre. On peut les passer à la coupellation; parfois, on les ajoute directement au plomb d'œuvre; le plus souvent, on préfère les refondre d'abord au four à cuve avec des produits plombeux, pour concentrer les métaux précieux dans le plomb obtenu et faire passer les autres éléments dans des mattes. Ce système s'emploie naturellement là où le raffinage du cuivre se trouve annexé à des usines à plomb, comme au Hartz, mais les établissements consacrés spécialement à la production du cuivre ont intérêt à traiter eux-mêmes leurs boues, sans recourir à la coupellation.

Le procédé le plus simple consiste à dissoudre le cuivre dans un bain d'acide sulfurique étendu où l'on fait arriver des

jets de vapeur et d'air, par des tuyaux en plomb perforés communiquant avec des injecteurs Kôrting. On obtient du sulfate de cuivre qui sert comme électrolyte, et le résidu insoluble, composé presque exclusivement de métaux précieux, est refondu.

Quand les boues sont de composition complexe, on les fond et on les coule en plaques, pour les soumettre à une nouvelle électrolyse dans une cuve séparée; ce traitement enlève la majeure partie du cuivre. Ce métal se dépose alors moins pur que dans les autres cuves. M. Thofern a indiqué un moyen de purifier les boues en dissolvant l'antimoine, le plomb, l'étain : il les suspend, dans un panier, au milieu d'un bain de chlorure de fer et les soumet à l'action d'un courant très faible.

Les résidus de cette seconde électrolyse, très riches en métaux précieux, peuvent être affinés par l'acide sulfurique concentré, pour séparer l'or. Dans quelques usines on les traite par le procédé Mœbius dont il sera question plus loin.

## ÉTUDE DU RÉGIME A ADOPTER.

Deux questions principales sont à considérer dans une affinerie : 1° la qualité des produits; 2° le prix de revient.

*Qualité du dépôt.* — D'après ce qui a été dit déjà, il faut, pour obtenir un bon dépôt :

1° Marcher avec une intensité modérée;

2° Ne pas trop rapprocher les électrodes;

3° Éviter l'enrichissement de la liqueur en éléments étrangers.

Toutes ces précautions doivent être poussées d'autant plus loin que le cuivre brut traité est moins pur. Elles imposent certaines limites entre lesquelles on pourra faire varier le régime électrique. Nous allons maintenant discuter ce régime au point de vue économique.

*Recherche du régime économique.* — Pour réduire le prix de revient, il faudrait augmenter la production et diminuer la dépense de force. Mais ces deux quantités, qui dépendent es-

sentiellement du régime électrique, varient dans le même sens.

La marche avec une grande densité de courant permet de produire plus de cuivre dans un même bain, mais elle augmente la dépense de force. En effet, le cuivre précipité dans chaque bain est proportionnel à l'intensité I, le travail varie comme le produit $RI^2$. Pour économiser la force, il faut diminuer R. On ne peut rapprocher les électrodes au delà d'une certaine distance, variable de $3^{cm}$ à $5^{cm}$, d'autant plus grande que le cuivre est moins pur. Ainsi, la résistance par unité de surface $Rs$ a un minimum constant, ou $R = \frac{r}{s}$. Le travail nécessaire pour déposer un poids donné dans un bain est donc proportionnel à la quantité $\frac{rI}{s}$.

On peut diminuer le travail en augmentant la surface d'électrodes du bain. On diminuera ainsi la résistance et l'on pourra mettre plus de bains en tension sur la même machine. Si la machine est faite pour donner, dans les meilleures conditions de marche, une intensité I avec un potentiel E, $n$ étant le nombre des bains, la relation entre $n$ et $s$ sera déterminée par l'équation

$$\text{(I)} \qquad \frac{nr}{s} \times I = E.$$

Le poids de cuivre déposé est représenté par $cnI$, $c$ étant la quantité déposée par heure et par ampère $= 1^{gr},18$.

Le travail électrique en chevaux-heures est $\frac{EI}{745}$; il coûtera $pEI$ si $p$ est le prix du cheval-heure divisé par 745, ou $p\frac{nr}{s}I^2$.

La dépense d'installation est de la forme $A + Bs$, CA étant le prix de la machine.

Si l'on amortit à 10 pour 100, c'est le rapport

$$\frac{\frac{1}{10}(A + Bs) + pEI}{cnI}$$

qui représentera le prix de revient. Il faudrait y ajouter une

constante F, pour les frais généraux, et une quantité proportionnelle au poids du cuivre $fcnI$, pour la main-d'œuvre, la préparation des anodes et des cathodes. On arrive donc en tout à l'expression

$$\text{(II)} \qquad \frac{F + \frac{1}{10}(A + Bs)}{cnI} + f + \frac{PrI}{cs}.$$

Le premier terme représente la part des frais généraux et des dépenses d'installation ; le second, les frais proportionnels ; le troisième, le coût du travail.

On voit que, pour diminuer le dernier terme, il faut augmenter $s$ ; pour diminuer le premier, il faut au contraire réduire $s$ et augmenter $n$. Il y a toujours intérêt à diminuer la résistance spécifique $r$, mais l'augmentation de la surface $s$ ne sera avantageuse que dans de certaines limites.

Dans chaque cas particulier on pourra chercher la solution la plus favorable si l'on connaît les coefficients qui entrent dans cette formule; il faudra régler $n$ et $s$ de manière à rendre minimum le rapport (II) tout en satisfaisant à l'équation (I).

La question de la disposition des bains est donc facile à discuter si l'on se donne les conditions de marche de la machine, c'est-à-dire E et I. Elle devient beaucoup plus complexe si l'on cherche la meilleure machine à employer et la manière la plus favorable de l'utiliser ; dans ce cas, les quantités E, I sont aussi variables, mais liées par certaines relations. En outre, le produit EI représente l'énergie électrique utilisée, de sorte que, pour avoir la dépense, il faut le multiplier par un coefficient variable dépendant du rendement du moteur.

Si l'on employait une pile, c'est-à-dire une source d'électricité donnant un potentiel constant, on démontrerait que le maximum de puissance utile correspond au cas où la résistance totale des bains est égale à la résistance intérieure de la pile, et que l'utilisation du travail est alors de 50 pour 100 [1]. Plusieurs auteurs ont généralisé ce principe, mais M. Fon-

---

[1] Ce raisonnement a été exposé dans notre Note sur la fabrication de l'aluminium.

taine a nettement démontré qu'il est loin de s'appliquer au régime des dynamos.

Une dynamo *marchant à une vitesse donnée* développe une force électromotrice E et une intensité I variables suivant la résistance sur laquelle on la ferme. L'expérience montre bien que la puissance effective, c'est-à-dire le produit EI, atteint son maximum quand la résistance extérieure R est égale à la résistance intérieure R'. Mais le travail moteur consommé n'est pas proportionnel à EI, de sorte que pour obtenir le maximum de rendement mécanique, il faut employer des résistances extérieures plus fortes. Le rapport $\frac{R}{R'}$, qui donne la meilleure utilisation du travail, a varié de 2 à 6 dans les expériences de M. Fontaine [1].

Si l'on augmente la vitesse, on obtient un voltage et une intensité plus élevés; mais il faut augmenter la résistance pour que la machine ne s'échauffe pas trop. Le travail est alors bien mieux utilisé : le maximum de rendement mécanique (qui ne correspond pas au maximum de puissance effective EI) s'est élevé à 0,79 dans les expériences de M. Fontaine, pour une vitesse de rotation de 1750 tours, alors qu'il était de 0,56 pour une vitesse de 550 tours.

La valeur absolue du produit EI augmente aussi beaucoup avec la vitesse : le maximum de puissance effective s'est trouvé de 65 wats pour la marche lente, de 520 wats pour la marche rapide; au moment où le rendement mécanique était le meilleur, cès chiffres étaient respectivement 36 et 232.

Ces expériences établissent nettement que, pour bien utiliser une machine donnée, il faut la faire marcher au maximum de vitesse dont elle est susceptible, en la fermant sur une résistance suffisante pour limiter l'échauffement. Cette résistance devra toujours être très supérieure à la résistance interne.

Le maximum de puissance effective correspondrait alors au minimum de résistance admissible; mais il ne coïncidera ni

---

[1] *Électrolyse*, par H. Fontaine; chez Baudry.

avec le maximum de rendement mécanique, ni avec le minimum du prix de revient. Pour évaluer ce dernier, il faudra tenir compte du travail moteur réel T, et non du travail théorique EI. Le coût de la force rapporté au poids déposé sera $\frac{pT}{cnI}$.

D'ailleurs, il y a entre T, E, I, une certaine relation qu'on peut déterminer par l'expérience, en mesurant ces quantités pour différentes allures de la machine, qu'on aura fait fonctionner à des vitesses et sur des résistances variables.

On peut donc écrire

$$T = \varphi\,(E, I)$$

$\varphi$ étant une certaine fonction empirique à déterminer pour chaque machine; ou encore, comme l'équation I doit toujours être satisfaite et que par suite E est fonction de l'intensité I et de la résistance $\frac{nr}{s}$,

$$T = \varphi\left(I, \frac{nr}{s}\right).$$

La quantité qu'il faut rendre minima est donc alors

$$\frac{F + \frac{1}{10}(A + BS)}{cnI} + f + \frac{p \times \varphi\left(I, \frac{nr}{s}\right)}{cnI}.$$

On pourra chercher la solution par tâtonnements, si l'on connaît bien la loi empirique des rendements de la machine, c'est-à-dire les fonctions $\varphi$ [1].

---

[1] Pour appliquer cette méthode de discussion, il faudrait dresser, comme nous l'avons dit, une Table empirique des valeurs correspondantes T, I, R pour différentes allures. On reconnaît qu'au voisinage du maximum, le rendement mécanique varie peu. On remplacera donc la fonction $\varphi$ par $\frac{knrI}{s}$, $k$ étant un coefficient moyen qui pourra s'appliquer entre certaines limites de R. On calculera ainsi le minimum, on en déduira la valeur à donner à R. On pourra avoir une seconde approximation en cherchant dans les Tables la valeur réelle du coefficient $k$ pour cette valeur de R, pour recommencer le calcul avec cette nouvelle donnée, et ainsi de suite.

Pour choisir entre plusieurs types de machines, il faudrait connaître la fonction caractéristique de chacune d'elles, et comparer les prix de revient minima ainsi établis.

En pratique, il paraît y avoir un avantage réel à augmenter la densité du courant au delà des limites primitivement adoptées dans la plupart des affineries d'Europe. M. Borchers donne, d'après M. Siemens, la comparaison suivante du prix de revient : 1° avec une densité faible; 2° avec une densité forte et des liqueurs chauffées.

| | 30 ampères par mètre carré. | 100 ampères Liqueurs chauffées. |
|---|---|---|
| Coût de la force motrice (à $0^{fr},06$ par cheval-heure)............ | $21^{fr}$ | $38^{fr}$ (1) |
| Main-d'œuvre .................. | 38 | 19 |
| Intérêt du cuivre immobilisé...... | 20 | 6 |
| Amortissement des installations... | 10 | 5 |
| Chauffage ($250^{kg}$ de charbon).... | » | 6 |
| Régénération des liqueurs........ | 5 | » |
| | 94 | 74 |

La densité du courant est limitée par les considérations indiquées plus haut. Elle peut être d'autant plus forte que le cuivre est plus pur. D'ailleurs, la pureté du cuivre permet de rapprocher les électrodes et de diminuer les résistances, par suite, d'augmenter la densité sans augmenter le voltage. Le chauffage des liqueurs aura la même influence favorable en diminuant la résistance spécifique du bain.

La quantité $\frac{I}{s} = i$ étant fixée par ces considérations, la production que l'on veut obtenir permettra de calculer le produit $cnis$. Le coefficient $c$, en pratique, peut être pris égal à 1, le rendement électrique ne dépassant pas 90 pour 100; l'installation sera ainsi largement prévue : $nis$ représente donc le nombre de grammes à produire par heure. Ce produit étant

(1) La dépense de force motrice devrait être relativement plus forte, mais ici, grâce au chauffage, l'augmentation de densité est obtenue surtout en diminuant la résistance, le voltage n'augmente pas proportionnellement.

déterminé, la formule (II) permettra de chercher le meilleur rapport à établir entre $n$ et $s$.

D'ailleurs, la surface $s$ est limitée par certaines considérations matérielles : on ne peut pas augmenter trop la largeur des bacs ni les dimensions des anodes sans rendre le travail difficile; on ne peut pas multiplier trop les plaques et allonger les bains sans s'exposer à voir le courant se répartir d'une manière inégale. Pour ce motif, les dimensions des bains se rapprocheront, en général, d'un type consacré par l'usage. Au moins pour les grandes affineries, il y aura intérêt à adopter les dimensions maxima acceptables ([1]); ainsi $s$ sera à peu près fixe et les relations précédentes permettront de calculer immédiatement le nombre des bains. Ce n'est que dans les petites affineries qu'on pourra diminuer la surface $s$ et les dimensions des bains, pour ne pas en employer un trop petit nombre en série.

## CALCUL D'UNE INSTALLATION.

Connaissant le nombre des bains, leur résistance et la surface d'électrodes, on pourra calculer le potentiel et la force motrice nécessaires pour une production donnée.

M. Fontaine donne, pour les solutions de sulfate de cuivre, la résistance spécifique suivante (par centimètre cube) :

| | |
|---|---|
| Solution à 10° Baumé, à la température de 25° C. . | 25 ohms. |
| Solution à 18° Baumé et à 20° C. . . . . . . . . . . . . . . . . | 20 » |
| Solution à 18° additionnée de 1 pour 100 d'acide et chauffée à 25°. . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . | 15 » |

La distance des électrodes varie de $3^{cm}$ à $7^{cm}$. Il y a intérêt à la réduire, mais on ne descend guère au-dessous de $5^{cm}$, parce que les boues détachées des anodes pourraient venir tomber sur les cathodes. Si l'on adopte cette distance, pour avoir la résistance d'un bain, on multipliera la résistance spécifique par 5 et l'on divisera par le nombre de centimètres carrés de surface totale des anodes : ainsi, pour $1^{mq}$, on aurait

(1) *Voir* ci-dessous les dimensions usuelles.

$\frac{1}{100}$ d'ohm en moyenne. On multipliera par le nombre de bains en tension pour avoir la résistance totale.

Les dimensions des électrodes sont limitées de manière à les rendre suffisamment maniables. Dans les grandes affineries, on emploie des anodes de $60^{cm}$ de large sur $90^{cm}$ de hauteur, et de $15^{cm}$ à $20^{cm}$ d'épaisseur. Elles peuvent peser environ $100^{kg}$. La longueur des bacs varie de $1^{m}$ à $3^{m}$, ils contiennent 10 à 12 anodes et, par suite, la surface utile peut varier de $10^{mq}$ à $20^{mq}$.

Dans une affinerie américaine employant 300 bains en série, à $20^{mq}$ de surface d'électrodes chacun, la résistance du liquide est de $0^{ohm},12$. Il faut ajouter : la résistance des conducteurs, environ $0^{ohm},01$ ; la résistance intérieure de la machine, $0^{ohm},002$ ; des résistances accessoires aux contacts qui, dans une installation bien entretenue, sont à peu près négligeables.

La résistance étant connue permettra de calculer le voltage, d'après la production qu'on veut obtenir ou la densité de courant qu'on choisit. Dans l'exemple précédent, si l'on veut marcher à 20 ampères par mètre carré, le courant total devra être de 400 ampères et le voltage de $400 \times 0,13$ ou 52 volts. Le poids de cuivre déposé par ampère-heure est théoriquement de $1^{gr},18$, soit $30^{gr}$ par ampère et par jour. On obtiendrait donc $12^{kg}$ par bain ou $3600^{kg}$ dans la série de 300. Le rendement réel sera inférieur de 5 à 10 pour 100. Si l'on marche à 80 ampères par mètre carré, soit 1600 en tout, la production sera quatre fois plus forte, et le voltage total atteindra 208 volts. Le travail consommé, qui est mesuré par le produit des volts par les ampères, deviendra seize fois plus fort. Ainsi la dépense d'énergie par kilogramme de cuivre sera d'environ 1 cheval-heure, tandis qu'elle eût été de $\frac{1}{4}$ de cheval à marche lente. L'installation, en tenant compte du rendement, exigera un moteur de 600 chevaux pour une production journalière de 15 tonnes, et, dans le premier cas, il n'aurait fallu que 50 chevaux pour faire $3^{t},5$.

Il semble au premier abord que la marche lente serait préférable. Mais les frais d'installation et le poids de cuivre immobilisé seront les mêmes dans les deux cas. Le poids des électrodes représente environ 600 tonnes ayant une valeur de

600000$^{fr}$, dont on comptera l'intérêt à 5 pour 100. L'installation peut coûter 400000$^{fr}$, qu'il faut amortir à 10 pour 100. Le prix de revient sera grevé d'une somme annuelle de 70000$^{fr}$ à répartir sur 5000 tonnes dans le cas de la marche rapide, soit 14$^{fr}$. Le coût de la force motrice, à 1$^{fr}$ par cheval et par jour, sera de 40$^{fr}$ par tonne.

Avec la marche lente, une partie des frais d'installation resteront les mêmes : on n'économisera que sur les moteurs et les dynamos. L'ensemble pourra être réduit à 250000$^{fr}$. Les amortissements et intérêts seront de 55000$^{fr}$ par an à répartir sur 1100 tonnes, soit 50$^{fr}$ par tonne, le coût de la force motrice tombera à 12$^{fr}$. On aura, pour ces deux articles, 62$^{fr}$ au lieu de 54$^{fr}$.

Il y a donc avantage à forcer la production, d'autant plus que les autres dépenses, dont nous n'avons pas tenu compte, ne sont pas toutes proportionnelles au poids de cuivre déposé. Les frais généraux, notamment, seront plus lourds pour une usine peu productive.

Cet avantage serait encore plus marqué si l'on utilisait des forces hydrauliques, avec lesquelles le coût du travail moteur serait quatre ou cinq fois moindre. Jusqu'à présent la plupart des affineries marchent à la vapeur : elles ont été établies comme annexes à des usines déjà existantes et ont, en Europe, des productions assez faibles. En Amérique, on a construit de grandes affineries, produisant beaucoup plus, et on a réalisé un abaissement notable du prix de revient. Il serait rationnel d'installer les grandes usines de ce genre auprès de forces naturelles, et il est probable qu'on réduirait alors le prix de revient de telle manière qu'il ne serait plus très supérieur à celui de l'affinage ordinaire.

*Choix des machines.* — Au début on a employé des machines à basse tension et, par suite, un nombre de bain relativement faible. Aujourd'hui on multiplie le nombre des bains, et l'on emploie des machines à potentiel plus élevé. En dehors des rendements plus favorables, ce système offre l'avantage de diminuer l'importance relative des courts circuits qui peuvent paralyser momentanément un bain.

Dans les affineries d'Europe citées par M. Fontaine, le nombre de bains ne dépasse pas en général 120, et la différence de potentiel totale est de 25 à 30 volts, avec des intensités de 300 à 1000 ampères, suivant la surface des bains et la densité admise pour le courant.

En Amérique on emploie des potentiels plus élevés et des densités plus fortes. M. Maurice Barnett indique comme type des machines de 120 volts et 1500 ampères, actionnant 300 bains. On voit que le potentiel par bain est plus élevé, 0,4 au lieu de 0,2; la densité du courant sera donc double à surface égale; aussi la dépense de force est plus grande, mais la production bien plus considérable pour le même nombre de bains. Ces machines coûtent environ $125^{fr}$ par kilowatt et peuvent donner un rendement de 90 pour 100.

Les dynamos construites en vue de l'électrolyse doivent être combinées pour marcher à vitesse modérée, 200 à 300 tours, car il est important d'éviter les dérangements. Toutes les pièces essentielles doivent être faciles à remplacer. Les commutateurs doivent être divisés en segments qu'on peut remplacer isolément.

Pour calculer le moteur nécessaire, il faut tenir compte du rendement électrique et du rendement mécanique. Le poids de cuivre réellement déposé n'est pas égal au poids théorique calculé d'après le nombre d'ampères; le rapport atteint au maximum 96 pour 100 et peut être inférieur à 90; il baissera à mesure qu'on emploiera du cuivre impur. Le rapport entre la puissance effective EI et le travail dépensé dépasse rarement 90 (quoiqu'il atteigne parfois 95) : il peut descendre à 80 et même au-dessous si la machine n'est pas bien adaptée aux conditions d'installation des bains, si elle n'est pas parfaitement entretenue. On devra donc compter un rendement total d'au plus 80 pour 100. En d'autres termes, si l'on a calculé EI, d'après la quantité de cuivre à déposer, au moyen des formules

$$P = cnI,$$

$$n\frac{r}{s}I = E,$$

au lieu de prendre pour la force en chevaux du moteur le nombre théorique $\frac{EI}{746}$, il faudra prendre $\frac{EI}{600}$ ou même $\frac{EI}{500}$.

### PRIX DE REVIENT.

Les principaux articles du prix de revient sont : 1° la force motrice, qui est très variable suivant le régime électrique, et peut en pratique se tenir entre 15 et 40 chevaux par tonne et par jour, suivant que la marche est lente ou rapide ; 2° l'amortissement des installations qui varie en sens inverse, et qui est très considérable : le poids de cuivre immobilisé dans les cuves peut représenter la production de deux à six mois, suivant la rapidité de marche; les amortissements et intérêts égalent souvent en importance tous les autres articles réunis; 3° la main-d'œuvre, qui peut être de 5$^{fr}$ à 10$^{fr}$ par tonne dans les grandes affineries; 4° la fabrication des électrodes, coûtant, pour les anodes, 10$^{fr}$ à 15$^{fr}$ par tonne de cuivre produit, pour les cathodes, 5 à 7$^{fr}$; 5° les frais généraux, qui peuvent être de 10$^{fr}$ à 15$^{fr}$ par tonne.

Il y a quelques années, les usines d'électrolyse faisaient payer 200$^{fr}$ par tonne de cuivre pour le raffinage. Aujourd'hui le prix de revient, en France, est de moins de 100$^{fr}$, d'après M. Fontaine. Dans les grandes usines américaines, il est inférieur à 50$^{fr}$, et il y en a qui font ce travail pour 50$^{fr}$ en payant 95 pour 100 de l'argent contenu. Le traitement d'une tonne de mattes à 50 pour 100, passées au Bessemer et à l'électrolyse, coûte au plus 60$^{fr}$.

D'après M. Fontaine, une installation pouvant produire 2500$^{kg}$ par jour coûte environ 190000$^{fr}$. Les matières en magasin et surtout le cuivre immobilisé représentent une valeur de 420000$^{fr}$. Pour une grande raffinerie américaine pouvant faire 500 tonnes par mois, soit une production six fois plus forte, M. Badt indique un prix de construction de 600000$^{fr}$, auquel il faudrait ajouter au moins 400000$^{fr}$ pour le cuivre immobilisé, et 100000$^{fr}$ pour les moteurs à vapeur si l'on n'emploie pas la force hydraulique.

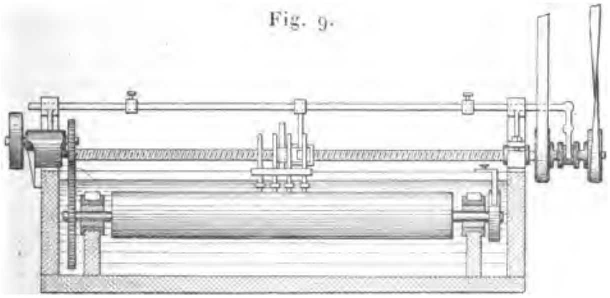
## PROCÉDÉS ELLMORE.

Les procédés Ellmore consistent à façonner le cuivre en même temps qu'on l'affine. C'est de la galvanoplastie appliquée à la production industrielle, notamment à la fabrication des tôles ou des tubes.

Le cuivre galvanoplastique possède une résistance remarquable; par suite de sa pureté, il peut supporter un travail mécanique presque indéfini sans s'écrouir. Mais les dépôts ordinaires sont parfois sujets à s'exfolier; ils peuvent contenir des traces de sulfate emprisonné entre les lits; leur grain est aussi trop cristallin. M. Ellmore a remédié à cet inconvénient par un artifice très ingénieux : il lamine le dépôt au fur et à mesure de sa formation, avec de petits frottoirs en agate qui viennent sans cesse labourer la surface. On obtient ainsi du premier coup un métal irréprochable. Cette compression continue permet d'effectuer le dépôt plus rapidement sans nuire à sa solidité; on peut porter la densité du courant jusqu'à 180 ampères par mètre carré.

La *fig.* 9 ci-jointe représente l'appareil primitif d'Ellmore. Le mandrin cylindrique sur lequel se fait le dépôt est en fer,

Fig. 9.



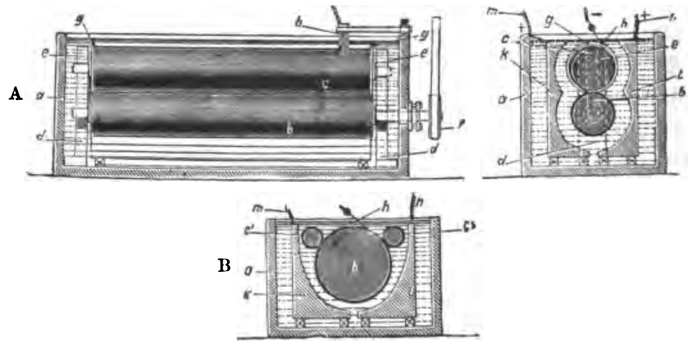
enduit de graphite pour empêcher l'adhérence; il est monté sur des paliers isolants en verre et animé d'un mouvement de rotation continu. Les frottoirs en agate sont suspendus à un chariot formant écrou, que la rotation d'une vis fait cheminer le long de la génératrice supérieure. Quand il arrive à bout de

course, un butoir fait jouer un système d'embrayage pour renverser le sens du mouvement. Les anodes sont des tiges de cuivre brut disposées tout autour du mandrin. On obtient ainsi des tubes; on peut faire des planches avec des mandrins de grand diamètre, en coupant le tube suivant une génératrice.

M. Ellmore avait proposé de fabriquer des fils en formant le dépôt sur un mandrin creusé d'une rainure hélicoïdale, dont les filets seraient protégés par un enduit isolant. Je ne crois pas que ce système ait été appliqué. Il vaut mieux découper la plaque tubulaire au tour en lanières que l'on tréfile ensuite.

On a proposé de remplacer les frottoirs en agate par de petits marteaux percuteurs. Dans un brevet récent pris par

Fig. 10.



la Société des cuivres de France, le frottement mécanique est remplacé par le roulement de deux cylindres tournant l'un sur l'autre. On place dans une cuve deux ou plusieurs mandrins en contact, rapprochés par des contrepoids ou des ressorts. A l'extrémité de ces mandrins, des anneaux en cuivre assurent la communication électrique au début de l'opération et les empêche de se frotter tant que le dépôt n'a pas acquis une épaisseur suffisante pour protéger l'enduit graphitique. Le courant arrive au mandrin supérieur par un balai; des anodes moulées entourent les différents mandrins, de manière à suivre à peu près leur contour. Nous remarquerons que la disposition des anodes représentée dans les figures ci-dessus (*fig.* 10 A et B) serait sans doute vicieuse : la circulation du

liquide doit rester libre, et, pour ne pas établir d'inégalités dans le dépôt, les conditions doivent être les mêmes le long d'une génératrice du cylindre; la forme de grille à barreaux longitudinaux est donc la seule qui convienne.

D'après M. Titus Ulke ([1]), le procédé Ellmore aurait donné des résultats médiocres; les tubes seraient sujets à s'exfolier. En France, au contraire, ce procédé est appliqué avec un plein succès à l'usine de Dives fondée par M. Secrétan. Les tubes obtenus sont de qualité remarquable, et très appréciés aujourd'hui par la Marine.

On opère dans des bacs dont la longueur, variable, va jusqu'à $4^m$; les mandrins ont des diamètres de $10^{cm}$ à $40^{cm}$. Les anodes sont des barres triangulaires coulées en cuivre rosette fondu au cubilot. Les frottoirs sont des manchons composés de deux secteurs en agate à serrage automatique, embrassant le tube, et parcourant sa longueur en une demi-heure. Le dépôt atteint $\frac{8}{10}$ de millimètre d'épaisseur en vingt-quatre heures. On peut faire 300 tonnes par mois avec une machine de 1500 chevaux.

Les tubes sont ensuite laminés sur olive, puis étirés au banc.

## TRAITEMENT DES MINERAIS DE CUIVRE

### ÉLECTROLYSE DIRECTE DES SULFURES.

*Traitement des mattes.* — M. Marchese et plusieurs autres inventeurs ont essayé d'extraire le cuivre de ses mattes par électrolyse; la matte (sulfure double de fer et de cuivre) est coulée en plaques qu'on emploie comme anode dans un bain de sulfate. Ce n'est, en somme, que l'extension du procédé d'affinage à des produits beaucoup moins riches. Mais, comme on n'a pas pu faire les premiers pas dans cette voie, c'est-à-dire traiter des cuivres bruts à 90 pour 100, il était à prévoir que des difficultés analogues et bien plus graves se présente-

([1]) *The mineral. Industry*, 1894.

raient quand on voudrait s'attaquer à des mattes contenant au plus 50 ou 60 pour 100 de cuivre.

*Essais du procédé Marchese.* — Cependant, des essais prolongés ont été faits dans deux usines, à Casarza et à Stolberg, sur un programme très bien étudié dans toutes ses parties, et qui pouvait sembler parfait en théorie.

1° Les minerais sont grillés incomplètement, de manière à obtenir un mélange de sulfures, sulfates et oxydes. On recueille les gaz pour fabriquer de l'acide sulfurique.

2° Le produit du grillage est lessivé avec de l'eau acide qui dissout les parties oxydées. Les résidus insolubles, contenant les sulfures inattaqués et des oxydes de fer, sont fondus et donnent une matte qu'on coule en plaques.

3° La dissolution obtenue par ce lessivage est électrolysée, en se servant de ces plaques de matte comme anodes. On précipite ainsi le cuivre en même temps qu'on dissout celui des mattes.

4° La liqueur électrolysée et appauvrie en cuivre repasse aux bacs de lessivage où elle se recharge aux dépens de nouveaux minerais grillés. Lorsqu'elle est trop chargée de sulfate de fer, on en précipite le cuivre chimiquement, avec de la ferraille, et on la met au rebut.

5° Les résidus des anodes (soufre, métaux insolubles, avec fer et cuivre incomplètement attaqués) repassent au grillage avec les minerais, ou séparément s'ils sont riches en argent.

*Énergie nécessaire.* — La décomposition du sulfate de cuivre, avec anode soluble, exige un potentiel de $1^{volt},28$; en comptant environ $0^{volt},20$ pour la polarisation, on aura une force électromotrice inverse de $1^{volt},50$ dans les bains. Quand on emploie des anodes en cuivre, la dissolution de ce métal compense la décomposition du sulfate, qui n'exige par suite aucune dépense d'énergie; la force électromotrice inverse se réduit à la polarisation, $0^{volt},20$. Le travail nécessaire sera donc sept fois plus faible. Quand l'anode est en sulfure, la dissolution du fer et du cuivre produit moins d'énergie disponible, parce qu'il en faut pour dissocier le sulfure ; elle ne compense plus

qu'en partie celle qui est absorbée par la précipitation, et l'on peut estimer que la force contre-électromotrice s'élève environ à $0^{volt},7$. D'après cela, le travail minimum nécessaire serait trois fois et demie ce qu'il est dans l'affinage, et comme dans les affineries on ne descend guère au-dessous de 15 chevaux par tonne et par jour, il en faudrait au moins 50 pour le procédé Marchese. En fait, dans les essais industriels, on en consommait au moins 75 à 80 : la tension au début n'était que de 1 volt, mais la polarisation la faisait rapidement monter, et elle atteignait parfois 5 volts.

Cette dépense de force ne serait pas par elle-même inacceptable, si l'opération marchait régulièrement. Mais il y a à compter avec des difficultés nombreuses : notamment, l'altération progressive des liqueurs, qui sont dès l'origine pauvres en cuivre, rend très difficile l'obtention d'un dépôt pur : la désagrégation des anodes les met rapidement hors de service, bien qu'on cherche à les soutenir en les ajustant dans des rainures en bois; on est donc obligé de les changer bien avant qu'elles soient épuisées. Il en résulte qu'une bonne partie des anodes repasse à la fusion, en même temps que le sulfate de cuivre repasse dans les bacs de lessivage. On n'obtient pas la désargentation d'un coup, parce que les résidus d'anodes sont trop riches en fer et en cuivre. Ainsi, les opérations accessoires, les repassages de matières se multiplient, et la marche de l'électrolyse est irrégulière.

D'ailleurs, le procédé ne dispense pas d'un grillage et d'une fusion. Or, une fois qu'on a les mattes, il est bien plus simple de les passer au convertisseur, ce qui donne immédiatement et sans grands frais du cuivre brut facile à affiner par l'électrolyse.

Il n'est donc pas étonnant que ces essais aient été abandonnés.

*Électrolyse des sulfures naturels.* — D'après les difficultés que rencontre l'électrolyse industrielle des mattes, c'est-à-dire de sulfures relativement riches, il est aisé de prévoir que les obstacles deviendraient insurmontables si l'on voulait traiter de cette manière des sulfures plus pauvres et mélangés de gangues terreuses, comme les minerais naturels.

On a cependant proposé à diverses reprises, comme une méthode générale pouvant s'appliquer à tous les minerais sulfurés, de les électrolyser après les avoir coulés en plaques, ou même constituer l'anode par du minerai en grains tassé dans des sacs où plongerait une tige conductrice. La faible conductibilité de ces matières s'ajouterait ici aux autres difficultés.

Il est inutile de discuter ces méthodes conçues *a priori* et qui n'ont jamais fait l'objet d'essais industriels.

## TRAITEMENT DES MINERAIS PAR DISSOLUTION ET ÉLECTROLYSE SÉPARÉES.

On a essayé, pour l'extraction du cuivre, deux autres procédés d'une nature toute différente, consistant à dissoudre d'abord le métal par lessivage du minerai avec un réactif approprié, puis à électrolyser la solution avec anodes insolubles, dans des conditions telles que le réactif se trouve récupéré.

*Dissolution à l'état de sulfate.* — Siemens et Halske attaquent la pyrite en la chauffant à 90° avec une dissolution de sulfate de sesquioxyde de fer légèrement acide.

$$Cu^2S + 2Fe^2(SO^4)^3 = 2CuSO^4 + 4FeSO^4.$$

La liqueur, qui se compose alors de sulfate de cuivre et de sulfate de protoxyde de fer, passe d'abord dans un compartiment supérieur contenant les cathodes, puis dans le compartiment inférieur contenant les anodes. Dans le premier elle dépose son cuivre, $2CuSO^4 = 2Cu + 2SO^4$; dans le second le sulfate de fer se réoxyde : $4FeSO^4 + 2SO^4 = 2Fe^2(SO^4)^3$. Le réactif est régénéré et l'absorption de l'oxygène par le sel de fer empêche la polarisation.

Les appareils employés sont très originaux. L'électrolyse se fait dans un large bac peu profond, divisé en deux étages par un filtre en feutre ou en toile. Au-dessous sont suspendues des grilles faites avec des barres de charbon montées dans un châssis en bois et réunies par des lames de plomb : ce sont les

anodes. Les cathodes sont des plaques minces de cuivre clouées sur des planches en bois. Un agitateur se glisse entre les cathodes et le filtre.

Théoriquement il ne faudrait qu'une force de $0^{volt},7$. On obtiendrait $15^{kg}$ par cheval par vingt-quatre heures. Les auteurs estiment à $260^{fr}$ les frais de traitement par tonne de cuivre (avec du minerai à 4 pour 100), à $300000^{fr}$ les frais d'installation pour une production d'une tonne par jour sans compter la force motrice et les bâtiments.

En pratique, on rencontre toujours les mêmes difficultés, usure des diaphragmes, des anodes, polarisation majorant la force électromotrice, et en outre on a de la peine à éviter le dépôt du fer qui se trouve en grande quantité dans la liqueur. Le procédé a été essayé sans succès à Stolberg.

*Emploi d'anodes en plomb.* — On a essayé aussi dans la même usine l'emploi d'anodes en plomb; elles ne s'usent pas, mais se polarisent rapidement, par formation de bioxyde $PbO^2$; la tension, de $1^{volt},7$ au début, monte bientôt au-dessus de 2 volts, et la production de cuivre baisse à 60 pour 100 de la quantité théorique. On évite cet inconvénient si l'on rend la liqueur très acide et l'on obtient alors un cuivre assez pur; mais la résistance devient considérable et l'on dépense trop de force. On a expérimenté à Stolberg l'emploi de l'acide sulfureux injecté dans les bains pour empêcher la formation de $PbO^2$; les premiers résultats avaient paru assez bons, mais on n'a pas continué les essais en grand. D'ailleurs, jusqu'à présent, aucune tentative industrielle pour empêcher les effets de la polarisation n'a réussi.

*Dissolution à l'état de chlorure.* — Le Dr Hœpfner emploie comme dissolvant du bichlorure de cuivre dissous dans du chlorure de calcium. Les pyrites cuivreuses s'attaquent suivant la réaction :

$$Cu^2S + 2CuCl^2 = 4Cu^2Cl^2 + S.$$

On fait passer une moitié de la dissolution dans les compartiments des cathodes, pendant que l'autre passe sur les

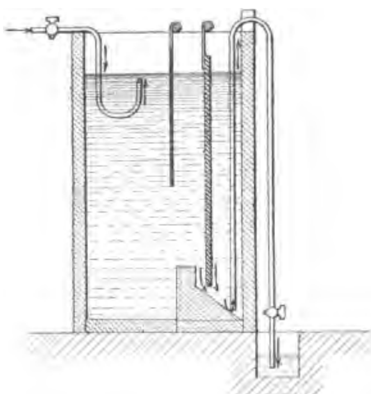
anodes. La première dépose son cuivre : $Cu^2Cl^2 = 2Cl + 2Cu$. La seconde absorbe le chlore qui tend à se dégager aux anodes : $Cu^2Cl^2 + 2Cl = 2CuCl^2$. On a donc extrait le cuivre de la pyrite et le réactif est régénéré. Les compartiments sont séparés par des diaphragmes en parchemin, et des courants d'air brassent le liquide.

L'argent se dissout dans la lessive et il faut le précipiter d'abord par du cuivre métallique; il convient de précipiter aussi l'arsenic, le bismuth, l'antimoine, le fer, par le bioxyde de cuivre ou la chaux.

Théoriquement il ne faudrait que $0^{volt},8$, et l'on devrait obtenir $44^{kg}$ par cheval par vingt-quatre heures. Mais, en pratique, le rendement descend souvent à la moitié de ces prévisions. Les diaphragmes s'usent rapidement.

Le système a été essayé sans succès à Schwarzenberg (Saxe), à Giessen et à Weidenau, près Siegen. On traitait à

Fig. 11.



Schwarzenberg des pyrites à 10 ou 12 pour 100 de cuivre. L'attaque du fer absorbait une grande partie du réactif; on dissolvait du premier coup la moitié du cuivre, mais le reste ne se dissolvait que très lentement.

Hœpfner a indiqué depuis un appareil (*fig.* 11) qui permet de supprimer les diaphragmes poreux en utilisant la tendance

du protochlorure à gagner le fond par suite de sa plus grande densité. Le fond du bac est incliné vers le compartiment anode et le liquide peut passer librement d'un compartiment à l'autre en passant sur un rebord.

## NICKEL.

Le nickel peut s'affiner comme le cuivre. On emploie comme anodes le nickel brut fondu, comme bain une dissolution de sulfate double de nickel et d'ammoniaque où l'on peut ajouter avec avantage des acides organiques, comme l'acide benzoïque ou l'acide citrique, qui jouent le rôle de réducteur. Ce procédé élimine bien le soufre et le carbone, mais non le fer et le cuivre, qui doivent être séparés préalablement.

Actuellement l'électrolyse paraît être employée surtout pour séparer le nickel du cuivre dans les produits extraits des minerais du Canada. Le procédé qu'on applique n'a pas été publié.

Au laboratoire, on sépare facilement le nickel du cuivre en électrolysant les sels avec des anodes insolubles en platine. Dans une liqueur acide on précipite le cuivre seul; pour précipiter ensuite le nickel, on rend la liqueur ammoniacale et l'on emploie un voltage plus élevé.

Ce procédé exige que les deux métaux soient d'abord dissous, et industriellement il serait sans doute trop coûteux, comme presque tous ceux où l'on emploie des anodes insolubles. Si l'on veut employer comme anode soluble l'alliage ou le sulfure coulé en plaque, les conditions se trouveront changées. En effet, si le nickel se précipite plus difficilement, il a, en revanche, plus de tendance à se dissoudre dans les acides et il précipite le cuivre de ses sels; il est donc probable que, dans un bain de chlorure ou de sulfate de nickel, ce métal s'attaquerait le premier dans l'anode, laissant le cuivre ou son sulfure en boues, et qu'on obtiendrait un dépôt de nickel pur. C'est peut-être sur ce principe qu'est fondée la séparation industrielle. Le nickel du Canada est, du reste, rarement tout à fait exempt de cuivre.

## ZINC.

### DÉPOTS GALVANIQUES.

Le dépôt électrique du zinc peut offrir un certain intérêt, soit comme moyen d'affinage, soit pour remplacer les procédés ordinaires de la galvanisation des tôles et des fils de fer. Le zinc pur est recherché pour les piles électriques et pour la fabrication du laiton. Les conditions de l'électrolyse sont assez différentes de celles du cuivre. La tension nécessaire théoriquement pour la décomposition du sulfate est de $2^{\text{volts}},33$, par conséquent supérieure à celle de décomposition de l'eau, ce qui sera une difficulté sérieuse pour la marche avec anodes insolubles. La polarisation est très forte, et la décomposition difficile à obtenir en liqueur acide. Le poids déposé par ampère-heure est de $1^{\text{gr}},211$, à peu près égal à celui du cuivre dans les solutions au maximum. La force en chevaux-heure nécessaire pour précipiter $1^{\text{kg}}$ avec anodes insolubles serait donc d'au moins $2^{\text{ch-h}},6$. La résistance spécifique des dissolutions (à 18° de température) est d'environ 21 ohms, pour une teneur de 20 à 30 pour 100, 31 à 10 pour 100, 52 à 5 pour 100. Elle diminue de 2 pour 100 par degré d'élévation de la température. Une forte densité de courant est nécessaire pour éviter la réoxydation du dépôt.

M. Mylius [1] a étudié l'électrolyse du sulfate de zinc en vue d'obtenir du métal chimiquement pur. Il est arrivé au résultat en déposant avec un courant faible du métal spongieux qu'il sublime ensuite dans le vide.

La formation du zinc spongieux est provoquée par des actions oxydantes et favorisée par la plupart des métaux étrangers contenus dans le zinc. On ne peut l'éviter qu'en prenant comme anode du zinc relativement pur ; il faut travailler avec une liqueur légèrement acide (0,016 pour 100 d'acide libre), une densité de courant d'au moins 1 ampère par décimètre

---

[1] *Zeitschrift für anorg. Chemie*, 1895, Band IX.

carré. On obtient alors des dépôts compacts tant que l'épaisseur ne dépasse pas $2^{mm}$. Les difficultés qu'on rencontre ne permettent guère d'arriver par cette voie à l'affinage industriel des zincs ordinaires, à moins de se résigner à recueillir le métal sous la forme spongieuse, en nettoyant d'une manière continue la cathode. Cette éponge contient une certaine proportion d'oxyde de zinc.

D'après le Dr Cohen ([1]), on améliorerait beaucoup les conditions de dépôt du zinc, ainsi que d'autres métaux, en employant des courants intermittents.

M. Lindemann ([2]) indique, pour obtenir des dépôts compacts, un tour de main curieux, consistant à mettre en suspension dans l'électrolyse du sulfure de zinc fraîchement précipité. Il opère sur une dissolution concentrée et pure de sulfate de zinc, où il précipite une partie du métal par l'hydrogène sulfuré. Il emploie des électrodes en plomb, et un courant de 108 ampères par mètre carré. Le dépôt continue tant qu'il ne s'est pas formé plus de $55^{gr}$ d'acide libre par litre : on peut donc extraire près de $3^{kg}$ de $1^{mc}$ avant de renouveler le bain. Les électrodes doivent être fréquemment changées et nettoyées. La liqueur acide peut servir à dissoudre des poussières zincifères, résidus de four, etc. Ces matières doivent être pures; cependant, un peu de fer ou de manganèse ne nuit pas à la qualité du dépôt.

Quels que soient les résultats, le procédé me semble peu approprié à une fabrication courante.

La galvanisation par immersion dans le zinc fondu, usitée depuis longtemps, présente certains inconvénients. Elle est difficile à pratiquer pour de grandes pièces qui refroidissent trop le bain; elle donne lieu à des pertes en zinc notables; ces pertes augmentent beaucoup, ainsi que les faux frais de toute nature, quand le travail est discontinu, par suite des dépenses qu'entraînent la fusion du zinc et la vidange des bains. Le dépôt obtenu a une épaisseur inutile : il se forme un alliage qui pénètre à une certaine profondeur dans le fer et diminue sa ré-

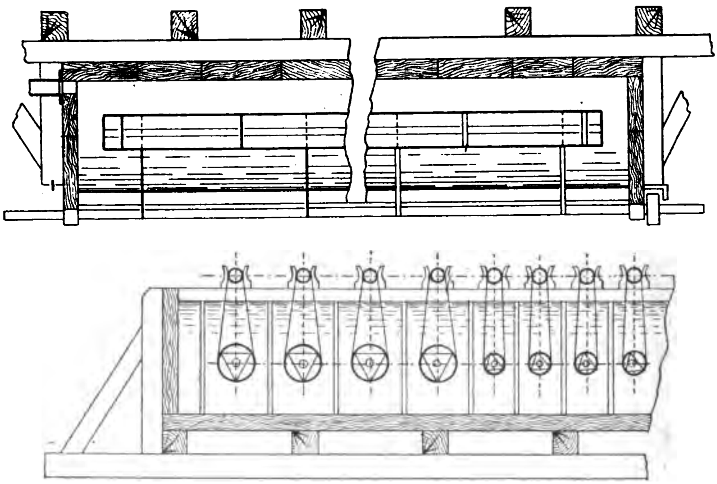
---

([1]) *Zeitschrift für Electrochemie,* 1895, H. X.
([2]) *Ibid.,* 1895, H. IX.

sistance. L'électrolyse permettrait d'obtenir des dépôts plus minces et de consommer beaucoup moins de zinc. Elle est appliquée avec succès à Glascow, d'après le procédé Cowper Coles; elle a été pratiquée aussi en Allemagne.

D'après Karl Richter ([1]) (Witkovitz), le meilleur électrolyte est une dissolution parfaitement neutre de sulfate, de den-

Fig. 12.



sité 1,20. Le dépôt est sain, d'un blanc d'argent, sans tache ni parties spongieuses, quand le courant est de 200 à 700 ampères par mètre carré. Avec un courant de 200 à 300 ampères on obtient un dépôt de $0^{mm},05$ en dix minutes. Il n'y a pas formation de gaz si le courant est parfaitement régulier et uniforme.

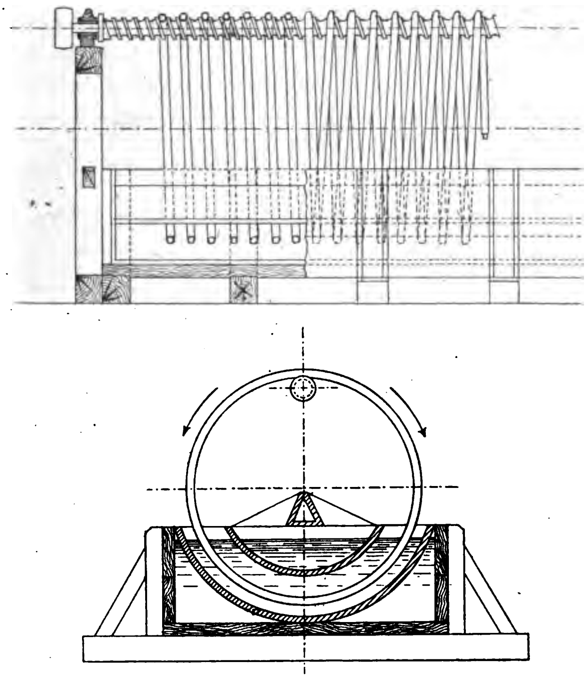
Il importe de mettre plusieurs prises sur un objet de grandes dimensions et de régulariser la répartition du courant par la distance des électrodes et au besoin par des résistances extérieures.

Les tuyaux sont suspendus dans le bain par des cordons qui permettent de leur imprimer un mouvement de rotation alternatif (*fig.* 12). On y cale une anode intérieure au moyen

([1]) *Elektrochemie*, 1895, H. 5.

d'un triangle en gutta. Deux plaques servent d'anodes extérieures. Les spirales (serpentins) sont soutenus par une tige qui permet de les faire tourner; la partie inférieure seule plonge

Fig. 13.



dans le bain et est entourée de deux tôles courbes formant anodes (*fig.* 13).

Une tension de 5 volts suffit, si les contacts sont bons, pour deux bains en série. Pour des tuyaux de 7 pouces, le courant total est de 2000 ampères.

Quand on aperçoit des irrégularités locales, on peut y parer en introduisant soit des écrans isolants là où le courant est trop fort, soit des anodes auxiliaires là où il est trop faible. Pour réparer de petits défauts, on peut frotter les endroits manqués avec la brosse galvanique de Wagner, trempée dans le liquide et reliée au pôle positif.

Le nettoyage parfait des objets est une condition essentielle du succès. On les dégraisse dans une solution de soude bouillante; il ne faut plus ensuite les toucher avec les mains. On les décape dans l'acide sulfurique à 7°,5 Baumé; cette opération se fait dans un trommel (20 tours par minute) où l'on ajoute du sable et de la paille. Il faut employer un souffleur à sable pour les objets dont la surface n'est pas lisse. On lave ensuite sous un jet d'eau à haute pression; puis on laisse séjourner dans une cuve à eau, avec 0,2 pour 100 d'ammoniaque pour éviter toute oxydation.

### TRAITEMENT DES MINERAIS.

On peut traiter les minerais oxydés du zinc en les dissolvant dans l'acide sulfurique; les blendes donneront par le grillage des oxydes et des sulfates; les gaz dégagés peuvent servir à fabriquer l'acide sulfurique nécessaire pour opérer ensuite la dissolution. Le traitement par voie humide des minerais de zinc pur offrirait un grand intérêt s'il était pratique, car les méthodes d'extraction actuelles sont encore très coûteuses; elles consomment beaucoup de charbon, exigent un personnel très exercé, et ne sont guère applicables que dans certains centres industriels privilégiés. Beaucoup de mines sont très éloignées de ces centres, et celles qui en étaient voisines s'épuisent. Des usines opérant par dissolution pourraient s'installer partout et avec des ouvriers quelconques.

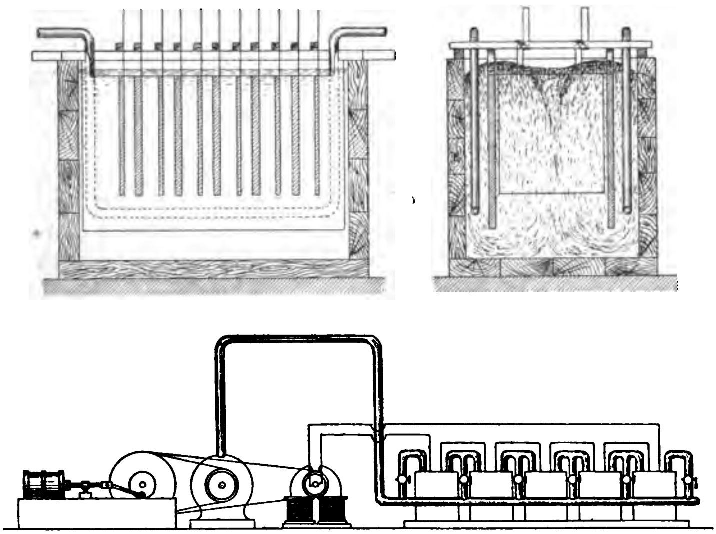
L'électrolyse est le seul moyen pratique de retirer du sulfate le zinc sous forme métallique.

M. Létrange a fait des essais industriels prolongés sur le traitement des oxydes et résidus d'usine. Il employait des électrodes en charbon : le dépôt était recueilli dans des sacs en mousseline enveloppant les cathodes. La liqueur circulait à travers les bains; l'acide sulfurique mis en liberté gagnant sans cesse la surface, était recueilli par déversoir pour dissoudre de nouveaux oxydes.

MM. Siemens et Halske ont étudié un procédé qui consisterait à griller, lessiver, puis électrolyser le sulfate avec des anodes insolubles en plomb ou en carbone. La solution est

à 10° Baumé, avec 5gr à 10gr d'acide sulfurique par litre. Des tuyaux perforés amèneraient de l'air comprimé au fond des cellules de manière à produire une agitation violente du liquide (*fig.* 14). Ce détail semble être le seul point original

Fig. 14.



du système qui, en principe, ressemble tout à fait à celui de M. Létrange. Il pourrait s'appliquer à n'importe quelle électrolyse.

Après l'insuccès des tentatives faites par les mêmes auteurs pour l'extraction du cuivre, on ne peut guère fonder grand espoir sur le nouveau procédé qu'ils annoncent, car le dépôt électrolytique du cuivre étant relativement plus facile que celui du zinc, il est bien probable que le problème sera résolu pour le premier de ces métaux avant de l'être pour l'autre.

La force électromotrice nécessaire pour décomposer le sulfate de zinc est théoriquement de 2volts,34. Dans une expérience sur le procédé Létrange rapportée par M. Fontaine, on a constaté une différence de potentiel de 2volts,6. L'élévation

du voltage est un inconvénient grave, car il détermine la décomposition de l'eau et, par suite, l'absorption d'une certaine quantité de travail. On dépense 5 chevaux-heure par kilogramme précipité, au lieu de 2,6 qui seraient théoriquement nécessaires. On n'obtient donc que $4^{kg}$ par cheval par vingt-quatre heures. En marchant à la vapeur, la dépense de charbon serait de 6 à 10 tonnes par tonne de zinc, c'est-à-dire notablement supérieure à celle des usines traitant par la voie sèche (au moins pour les minerais riches).

Le rendement mécanique résultant de cette expérience est de 52 pour 100; or, jusqu'à ce jour, les méthodes d'extraction électrolytique essayées ou appliquées à d'autres métaux comme l'aluminium et le cuivre n'ont pas donné industriellement une meilleure utilisation du travail. On n'est donc pas fondé, jusqu'à nouvel ordre, à espérer un progrès notable à ce point de vue, et il est à peu près certain que le traitement électrique des minerais de zinc ne peut pas être rémunérateur si l'on marche à la vapeur.

Avec des forces hydrauliques, le coût de l'énergie électrique ne dépasserait pas $50^{fr}$ par tonne de zinc. Il faudrait ajouter une somme de $50^{fr}$ à $100^{fr}$ pour l'amortissement des installations qu'on peut évaluer en bloc entre $500^{fr}$ et $1000^{fr}$ par force de cheval. Avec les frais de main-d'œuvre, de grillage, dissolution, etc., on peut estimer que l'ensemble du traitement reviendrait entre $200^{fr}$ et $300^{fr}$ par tonne.

Il pourrait être avantageux dans certains cas, mais seulement là où la réduction par voie sèche est impossible, soit par suite de la situation de la mine, soit par suite de la nature du minerai. Lorsque la blende est intimement mélangée à la galène, il n'y a aucun moyen pratique d'en extraire les deux métaux; la préparation mécanique ne suffit pas toujours à bien séparer ces minéraux et elle donne lieu à de grandes pertes en métaux précieux lorsque la galène est argentifère.

C'est ainsi qu'au Broken-Hill (Australie) il existe un stock considérable de minerais mixtes qu'on a jusqu'à présent renoncé à traiter. C'est l'utilisation de ce stock qui est depuis plusieurs années l'objectif des inventeurs, et qui provoque des recherches incessantes sur l'électrolyse.

On peut, en effet, griller les minerais mixtes, les lessiver pour dissoudre le sulfate de zinc et achever la dissolution de ce métal avec de l'acide sulfurique qui laisse insoluble le sulfate de plomb et l'argent. On obtient alors le zinc dans une dissolution de sulfate, et l'électrolyse paraît être le moyen le plus pratique de le mettre sous la forme marchande. D'ailleurs, la situation n'est plus la même que pour le traitement des minerais de zinc ordinaires : les bénéfices dus à l'extraction du plomb et de l'argent permettent d'attribuer au sulfate de zinc une valeur très faible, et il suffirait que ce dernier métal pût payer largement les frais d'électrolyse. Ce résultat même est encore douteux.

On dit cependant qu'une société au capital de 12 millions s'est formée pour traiter les minerais de Broken-Hill par le procédé Siemens.

M. Lorenz a breveté un procédé consistant à extraire le zinc et le plomb par électrolyse de leurs chlorures fondus. Il pense pouvoir séparer les deux métaux par électrolyse progressive. Le chlore dégagé servirait à régénérer de l'acide chlorhydrique pour l'attaque des minerais. Ce brevet n'est qu'un programme dont la réalisation se heurterait sans doute à des difficultés pratiques insurmontables. L'électrolyse par fusion ignée offre l'avantage d'être beaucoup plus rapide que par voie humide; mais il est peu probable qu'on arrive de cette manière à des procédés assez économiques pour s'appliquer aux métaux usuels.

## ANTIMOINE.

Le traitement électrolytique des minerais d'antimoine offrirait un intérêt sérieux. Le traitement par voie sèche est coûteux et donne un mauvais rendement : les gisements, très disséminés, n'ayant qu'une production faible, sont pour la plupart très éloignés des usines; les minerais pauvres restent souvent inutilisés. L'électricité permettrait partout le traitement sur place.

Plusieurs brevets ont été pris, sans qu'il y ait eu jusqu'à présent de tentatives industrielles sérieuses.

Le traitement comprend forcément deux opérations : 1° l'attaque et le lessivage du minerai; 2° l'électrolyse de la liqueur avec anodes insolubles. L'électrolyse du chlorure ne paraît pas donner de très bons résultats, et il peut se former des composés explosifs. Les sulfosels alcalins se prêtent mieux à cette opération.

On peut attaquer le minerai en le fondant avec du sulfate de soude et du charbon, ou en le faisant digérer à chaud avec une dissolution de sulfure de sodium. D'après Borchers, on doit viser à la composition suivante

$$Sb^2S^3 + 3Na^2S;$$

il importe d'observer ce rapport entre le soufre total et le sodium, sans quoi les liqueurs sont instables, il peut se séparer du soufre à l'électrolyse; ou, si la soude est en excès, la résistance est plus grande. On emploie des anodes en plomb et des cathodes en fer : la force électromotrice est de 2 volts, la densité du courant de 100 à 40 ampères par mètre carré. Borchers conseille de la diminuer avec la concentration de la liqueur en faisant circuler celle-ci dans une série de bacs de plus en plus larges. La concentration doit être de 12° Baumé environ, et l'on ajoute 3 pour 100 de sel marin.

On obtient la presque totalité de l'antimoine sous forme d'éponge qui doit être refondue avec des scories alcalines et raffinée par les moyens ordinaires; le raffinage électrique n'a pas, jusqu'à présent, réussi.

La liqueur électrolysée contient de l'hydrosulfure NaHS, du bisulfure $Na^2S^2$, et de l'hyposulfite. On peut la traiter pour en extraire une partie du soufre à l'état libre, ou pour transformer tout en hyposulfite.

Ce procédé pourrait s'employer dans certaines fabriques de produits chimiques où le sulfate de soude est un sous-produit encombrant et de peu de valeur. Mais, au point de vue de l'industrie de l'antimoine, il ne se prête pas au traitement près des mines; il faudrait pour cela que le réactif fût moins coûteux, ou que la liqueur après l'électrolyse pût être régénérée facilement et employée à dissoudre de nouvelles quantités de minerai.

## ÉTAIN.

L'électrolyse s'emploie avec succès pour séparer l'étain des déchets et rognures de fer-blanc. C'est le seul procédé qui permette d'obtenir directement de l'étain métallique et des riblons exempts d'étain, vendables aux usines à fer.

On a opéré d'abord avec des bains acides. L'étain se précipite seul à la cathode, mais il n'est pas parfaitement pur et l'on dissout trop de fer. On ne peut pousser le travail jusqu'au bout, à cause de la teneur croissante en fer de la liqueur; il reste donc des riblons encore chargés d'étain, et l'on doit achever leur traitement par des procédés chimiques.

L'emploi des bains alcalins paraît préférable; on commence avec une dissolution de sel marin (12 pour 100) additionnée de quelques centièmes de soude caustique. Cette liqueur dissout spontanément l'étain à 40° ou 50°, et s'enrichit peu à peu. On doit entretenir l'alcalinité par des additions de soude. Les rognures, tassées dans des paniers en fer, servent d'anode; des feuilles de fer-blanc forment les cathodes. La densité du courant ne doit pas dépasser 150 ampères par centimètre carré. La tension, faible au début, augmente jusqu'à 3 volts à mesure que la dissolution se charge. On doit arrêter quand la concentration est trop grande. On obtient ainsi une certaine quantité de stannate de soude comme sous-produit. L'étain spongieux déposé doit être refondu.

Aucun procédé d'électrolyse pratique n'a été essayé jusqu'à présent pour extraire l'étain de ses minerais.

## ALLIAGES DES MÉTAUX PRÉCIEUX.

### DÉSARGENTATION DU PLOMB.

Le procédé Keith pour l'affinage du plomb argentifère a été essayé en Amérique. On employait comme anode le plomb brut fondu en plaques étroites que l'on suspendait dans des cuves cylindriques, entre des cylindres de laiton formant ca-

thode. Le bain était une dissolution de sulfate de plomb dans l'acétate de soude. L'argent resté en boue à l'anode était recueilli dans des sacs de mousseline. La force électromotrice était d'environ 10 volts pour trente cuves; la densité du courant, de 20 ampères par mètre carré. Un courant de 2000 ampères déposait par cuve environ $100^{kg}$ par jour.

D'après Halske, la plus grande partie du zinc et du bismuth se dépose avec le plomb. Le dépôt est dendritique et il faut le racler souvent pour éviter les courts circuits. D'après les expériences de Borchers, les chiffres indiqués pour le régime électrique semblent faibles. La tension devrait atteindre au moins $0^{volt},5$ et il faudrait compter une force de 8 à 10 chevaux par tonne de plomb affinée par jour.

Le procédé a été abandonné. Il est lent et plus coûteux que la séparation par voie sèche. Il suppose d'ailleurs deux fusions du plomb, avant et après.

A Hoboken, on a traité pendant quelque temps par électrolyse l'alliage mixte de plomb-zinc-argent, qu'on obtient en affinant le plomb d'œuvre par le zinc. Les électrodes étaient des disques tournants, soumis à un brossage continu. Le zinc seul se dissout dans l'électrolyte (sulfate de zinc). Les deux autres métaux restent en boue à l'anode.

Ici, il s'agit d'un produit très riche en argent, pour lequel l'électrolyse est mieux justifiée. Néanmoins, on est revenu à l'ancien procédé de distillation.

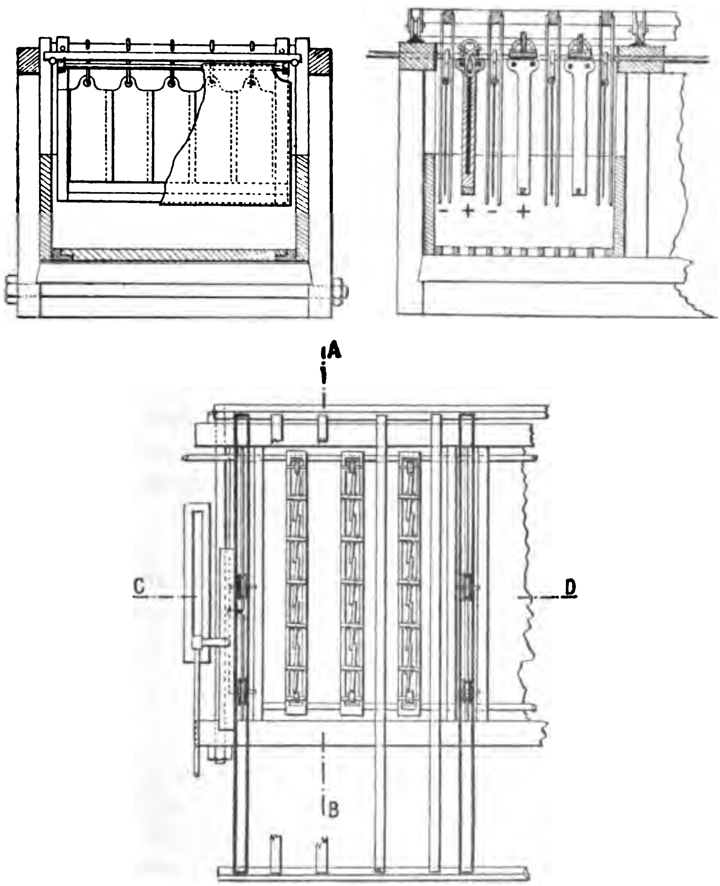
### AFFINAGE DE L'ARGENT.

Le procédé Mœbius est employé au Mexique, en Pensylvanie et à Hambourg pour l'affinage des bullions cuivreux, et paraît donner de bons résultats. L'électrolyte est une solution concentrée de chlorures alcalins, additionnée d'acides azotique et sulfurique, ou une dissolution d'azotate d'argent avec $\frac{1}{10}$ d'acide azotique libre. L'argent et le cuivre de l'anode s'y dissolvent; l'argent seul se dépose à la cathode si le voltage n'est pas trop fort. Le cuivre reste dissous dans le liquide, à condition que celui-ci soit suffisamment acide, et qu'il ne devienne ni trop

pauvre en argent ni trop riche en cuivre. L'or et le platine restent à l'anode.

Les plaques d'argent, de $0^{m},25$ de large sur $0^{m},40$ de long, sont suspendues en files de quatre à des tringles transversales

Fig. 15.

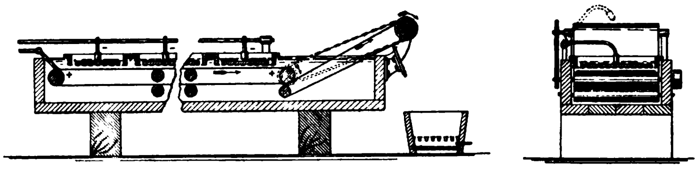



et forment l'anode, enfermée dans un sac de mousseline. Les cathodes sont des lames minces d'argent. Le dépôt forme des filaments que des racloirs mobiles sur rails font tomber. La cuve porte un faux fond et une toile filtrante (*fig.* 15). A Ham-

bourg, une force nominale de 25 chevaux permet de traiter une tonne d'argent par jour. Il y a 70 bains en série. Le courant est de 100 volts et 150 ampères, ce qui fait plus de 300 ampères par mètre carré.

L'inventeur a fait breveter récemment un appareil qui semble très bien combiné pour réaliser l'électrolyse continue. Les anodes plongent dans des vases dont le fond est formé par un diaphragme poreux qui peut s'enlever facilement. La cathode est une toile sans fin, recouverte d'argent, qui vient passer sous ces vases. Le dépôt boueux qui s'y forme est ainsi transporté d'un mouvement continu vers l'extrémité de la cuve, où il tombe sur une autre toile inclinée, frottant contre la première; cette seconde toile remonte hors du bain (*fig.* 16). La surface de la cathode se trouvant sans cesse ra-

Fig. 16.



fraîchie, on évite les courts circuits. Les dépôts qui se forment à l'anode sont facilement enlevés avec les diaphragmes sur lesquels ils tombent.

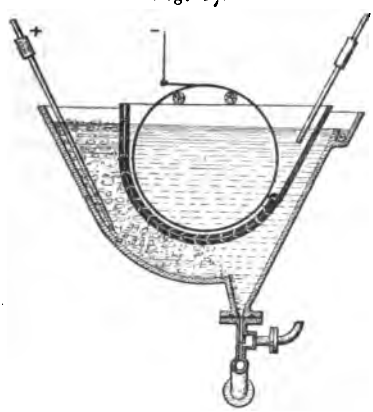
Le schlamm aurifère qui reste dans les sacs doit être traité à l'acide azotique pour achever de dissoudre l'argent.

Le procédé s'applique surtout à l'argent contenant très peu d'or. L'affinage par les acides convient mal à ce cas particulier et offre l'ennui des vapeurs sulfureuses qui se dégagent. L'argent doit être amené d'abord, autant que possible, au titre de 95 pour 100. L'électrolyse des alliages riches en cuivre se fait beaucoup moins bien.

Borchers indique un appareil intéressant (*fig.* 17) pour traiter sous forme de grenailles les alliages qui donnent des précipités lourds : la cuve est évasée par le haut, le compartiment cathode est cylindrique et fermé; du côté des anodes, la cloison

est double, à parois perforées, l'interstice rempli de matières filtrantes, et ne va pas jusqu'en bas. Les grenailles sont tassées d'un côté de cette cloison, et une tige amenant le courant plonge au milieu d'elles. Le liquide arrive sur la cathode et passe dans le compartiment anode qu'il parcourt en montant. Il se déverse du côté opposé. On soutire les boues par le bas. On peut aussi injecter une partie de la solution par le fond.

Fig. 17.




Quand le filtre est bien tassé, il n'y a presque pas de passage du liquide entre les deux compartiments. Le courant ascendant, dont on peut régler la vitesse, produit une sorte de séparation mécanique des schlamms.

La feuille cylindrique formant cathode tourne sur des galets et reçoit le courant par un balai. Sa grande surface permet l'emploi de courants intenses.

## EXTRACTION DE L'OR.

### PROCÉDÉ SIEMENS.

L'électrolyse a été appliquée par Siemens et Halske pour la précipitation des solutions de cyanure d'or obtenues dans le traitement des *tailings* par le cyanure de potassium. On emploie des anodes en fer et des cathodes en plomb. Les anodes sont disposées en chicane, les unes touchant le fond du bain,

les autres suspendues, de manière que la liqueur est obligée de circuler en serpentant entre toutes les plaques. Le courant a une densité très faible, de $0^{\text{ampère}},65$ par centimètre carré. Une machine de 8 volts et 600 ampères alimente quatre bains contenant 75 anodes. La surface des plaques est de $30^{\text{mq}}$ pour passer $100^{\text{mc}}$ de solution par jour, ce qui représente plus de $1^{\text{mq}}$ par gramme d'or précipité en vingt-quatre heures. Une machine de 5 chevaux suffit à une installation de cette importance, qui peut traiter 30 tonnes de tailings par jour. On consomme $340^{\text{kg}}$ de plomb et $490^{\text{kg}}$ de fer par mois.

L'attaque du fer produit aux anodes un précipité de ferricyanure bleu avec lequel on peut régénérer du cyanure. Il suffit de le dissoudre dans la potasse caustique, évaporer la liqueur et fondre avec du carbonate de potasse.

Les bacs sont entièrement fermés; on en retire tous les mois le plomb des cathodes qui contient 2 à 12 pour 100 d'or sous forme de dépôt adhérent, et on le coupelle.

Ce procédé a remplacé dans plusieurs usines du Transwaal la précipitation par le zinc. L'électrolyse épuise beaucoup mieux les liqueurs et permet d'employer des solutions beaucoup plus étendues ; on lessive avec des liqueurs dont la teneur en cyanure est de moins de 0,1 pour 100, variant de 0,02 à 0,08, tandis que pour la précipitation par le zinc on emploie des liqueurs tenant de 0,2 à 0,8 pour 100 de cyanure. Cette modification a permis de réduire au quart ou au cinquième la consommation de ce réactif, et le prix de revient de l'ensemble du traitement s'abaisse à près de $3^{\text{fr}}$ par tonne de tailings, tandis qu'il est d'au moins $5^{\text{fr}}$ par le procédé ordinaire (1).

## ESSAIS D'ÉLECTROLYSE DIRECTE.

Divers procédés ont été essayés pour produire à la fois l'attaque et le dépôt de l'or dans la même opération.

(1) Malgré les succès que ce procédé a obtenus à ses débuts au Transvaal, il ne paraît pas se répandre beaucoup. On est parvenu depuis à obtenir des résultats presque aussi avantageux avec la précipitation par le zinc. En Hongrie, le procédé Siemens a médiocrement réussi, peut-être à cause de l'abondance des sulfures dans le minerai.

*Chloruration.* — Si l'on électrolyse une dissolution de chlorure de sodium, le chlore libre se dégage à l'anode et peut dissoudre l'or des minerais. Cette méthode, si simple en théorie, semblerait d'autant plus indiquée qu'on emploie depuis longtemps le chlore pour attaquer les minerais rebelles et la précipitation électrique pour extraire l'or. Cependant il n'a pu entrer dans la pratique.

Il n'est pas facile de faire passer rapidement dans une cuve d'électrolyse une grande quantité de minerai. En l'absence d'un agent capable d'absorber énergiquement le chlore, on ne peut éviter la polarisation et l'usure rapide des anodes. Enfin la dissolution de l'or ne se fait bien que sur les parcelles qui touchent l'anode.

*Cyanuration.* — Il parait plus facile de réussir avec le cyanure, qui par lui-même dissout l'or.

Le procédé Pelatan-Clerici est fondé sur l'emploi de ce réactif et semble donner de bons résultats.

Le minerai est versé dans une cuve cylindrique où se trouve un disque horizontal en fer, qui fait fonction d'agitateur et d'anode. Une couche de mercure couvrant le fond de la cuve forme cathode. Dans l'appareil d'essai on peut traiter, en huit heures, une charge de $100^{kg}$ avec $100^{lit}$ d'eau, à laquelle on ajoute environ $100^{gr}$ de cyanure de potassium et $10^{gr}$ de ferricyanure, avec un peu de sel et de chaux. Le courant est de 5 volts et 6 ampères. On obtient un bon rendement, et la consommation de cyanure serait moins grande qu'avec la méthode ordinaire.

Le procédé a été monté récemment sur une grande échelle en Amérique.

*Amalgamation.* — Dans l'amalgamation ordinaire aux pans, si l'on met le mercure en relation avec le pôle négatif d'une dynamo, et qu'on place dans le liquide une tige formant anode, on préserve le mercure de l'oxydation et l'on diminue les pertes. D'après Molloy, il se formerait un amalgame d'hydrogène. L'addition au mercure d'amalgame de sodium produit le même effet protecteur. On peut préparer cet amalgame en

électrolysant du carbonate de soude avec anode en plomb et cathode en mercure.

Toutefois les procédés Molloy, longtemps essayés en Amérique, ne paraissent pas offrir d'avantages industriels sérieux. D'après Gmehling, les essais faits à Huanchaca n'ont pas été favorables : l'amalgamation est peut-être un peu plus rapide, mais le travail sans électricité est en somme moins coûteux.

---

En résumé, l'électrolyse par voie humide ne peut pas être considérée jusqu'à présent comme un moyen d'extraire les métaux. En dehors de l'extraction de l'or par le procédé Siemens, ce n'est qu'une méthode de séparation ou de dépôts galvanoplastiques. Le plus souvent même, elle ne s'applique qu'à l'affinage de métaux déjà purs. L'affinage du cuivre et celui de l'argent pauvre en or rentrent dans ce cas ; le premier constitue de beaucoup la plus grande application industrielle que l'électrolyse ait reçue ; le second, quoique moins important, ne manque pas d'intérêt, et son succès paraît aussi définitivement consacré par l'expérience. L'affinage du nickel cuivreux ferait exception à la règle, car il s'agit là de séparer deux métaux alliés en proportion comparable ; mais on ne sait pas bien dans quelles conditions il se fait, et, si on l'emploie, c'est peut-être faute d'avoir encore trouvé un procédé plus simple pour traiter les mattes du Canada, qui n'ont paru sur le marché que depuis peu d'années.

Toutes les tentatives d'affinage d'autres métaux paraissent abandonnées. Tous les essais pour le traitement des minerais ont échoué : il est bien à craindre qu'il n'en soit de même pour les essais d'extraction électrolytique du zinc que le problème du Broken-Hill a remis à la mode.

La galvanisation électrique, qui paraît, au contraire, appelée à un réel succès, rentre dans la catégorie des procédés où l'on n'a en vue qu'un simple dépôt, et où le courant ne fait que déplacer le métal, sans produire aucune réaction chimique. Nous l'avons mentionnée à cause de sa nouveauté, bien qu'elle fût en dehors du cadre général de cette étude.

On peut remarquer que tous les procédés adoptés par l'industrie emploient des anodes solubles. Même dans le procédé Siemens pour la précipitation de l'or, où l'anode théoriquement devrait être insoluble, on a été amené à employer des anodes en fer, qui s'attaquent en proportion bien supérieure à celle qui équivaudrait à l'or déposé. On peut donc dire que le courant n'est jamais employé à produire par lui seul une décomposition chimique; il sert en réalité à provoquer des déplacements, où la précipitation d'un métal sur la cathode est toujours compensée chimiquement par la dissolution à l'anode du même métal ou d'un autre, et les opérations marchent d'autant mieux que cette compensation est plus exacte.

Il y a là une différence essentielle avec les applications de l'électrolyse par voie ignée, qui est au contraire uniquement employée pour l'extraction des métaux (aluminium, métaux alcalins) et dont toutes les opérations se font avec des anodes insolubles, l'électricité produisant seule la décomposition des sels fondus.

D'après ce rapprochement, on peut se demander si ce n'est pas plutôt ce dernier genre de méthodes qui est appelé à résoudre plus tard le problème du traitement des minerais rebelles aux procédés purement chimiques, et à étendre le domaine de l'Électrométallurgie.

# NOTE.

Nous donnons ici le Tableau d'une série d'essais que M. Secrétan a bien voulu faire faire à notre demande et qui montrent les qualités remarquables du cuivre fabriqué par les procédés Ellmore.

ESSAIS DE TRACTION SUR LE CUIVRE ÉLECTROLYTIQUE DE L'USINE DE DIVES.

| DÉSIGNATION DES ÉPROUVETTES. | SECTIONS INITIALES. | | CHARGE DE RUPTURE | | DISTANCE entre les repères. | ALLONGEMENTS | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Dimensions en millimètres carrés. | Surfaces en millimètres carrés. | totale. | par millimètre carré. | | entre les repères. | pour 100. |
| Brute d'électrolyse.. | 30 × 5,3 | 159 | 4760 | 29,9 | 200 | 50 | 25 |
| Id. .. | 29,9 × 3,15 | 94,18 | 2735 | 29 | 200 | 48 | 24 |
| Brute d'électrolyse et recuite .......... | 30 × 5,3 | 159 | 3425 | 21,5 | 200 | 92 | 46 |
| Brute d'électrolyse et recuite .......... | 30 × 2,58 | 77,4 | 1670 | 21,5 | 200 | 82 | 41 |
| Étirée écrouie...... | 30 × 4,2 | 126 | 4000 | 31,7 | 200 | 12 | 6 |
| Id. ...... | 30,1 × 2,05 | 61,7 | 2060 | 33,3 | 200 | 9 | 4,5 |
| Id. ...... | 29,9 × 1,65 | 49,3 | 1530 | 31 | 200 | 9 | 4,5 |
| Étirée recuite...... | 30 × 4,2 | 126 | 2745 | 21,7 | 200 | 92 | 46 |
| Id. ...... | 29,8 × 2,05 | 61 | 1280 | 21 | 200 | 86 | 43 |
| Id. ...... | 29,9 × 1,63 | 48,7 | 1080 | 22,2 | 200 | 90 | 45 |

OBSERVATIONS : Malgré le peu d'allongement obtenu sur le cuivre écroui, on peut facilement rabattre à froid des collerettes triple du diamètre.

# RECHERCHES

## SUR LES INSTRUMENTS, LES MÉTHODES ET LE DESSIN TOPOGRAPHIQUES,

**Par le Colonel A. LAUSSEDAT.**

### AVERTISSEMENT.

L'étude que je publie aujourd'hui a été entreprise à propos du Congrès des Sciences géographiques tenu à Londres en juillet 1895.

Le programme des questions que les organisateurs de ce Congrès avaient préparé comprenait celle de l'application de la Photographie au lever des plans, et le Bureau de la Société de Géographie de Paris m'avait fait l'honneur de me demander de la traiter.

J'avais accepté avec empressement, car je voyais dans cette démarche un symptôme de bon augure pour le succès définitif d'une méthode que je recommande depuis un si grand nombre d'années et qui nous revient aujourd'hui, de tous les côtés, de l'étranger où elle a eu moins de peine à s'acclimater que dans son pays d'origine.

Cette résistance à accueillir chez nous ce qui fut une nouveauté et qui maintenant en a perdu la fleur, ne m'a jamais trop surpris. J'avais été cependant très encouragé, dans mes débuts, par des chefs et par des camarades aussi éclairés que

bienveillants [1], mais il avait presque aussitôt fallu compter avec la famille innombrable des tardigrades et des sceptiques et, ce qui est pis encore, avec la sourde hostilité des gens de parti pris, plus ou moins désintéressés. Ces derniers, en effet, finirent par convaincre le service du Génie, qui avait patronné nos essais, qu'il n'avait rien à attendre d'un procédé qui s'éloignait par trop, selon eux, des méthodes rigoureuses enseignées dans ses écoles.

Dans les autres services publics, ces essais étaient à peine connus et, d'ailleurs, il faut bien l'avouer, la plupart des chefs de ces services semblent ne plus avoir le temps de procéder eux-mêmes à des études topographiques, qu'ils confient le plus souvent aujourd'hui à des entrepreneurs spéciaux travaillant à la tâche.

Restaient, heureusement en assez grand nombre, les indépendants et, parmi eux, les explorateurs qui, accoutumés à ne compter que sur eux-mêmes et ayant souvent recours à la Photographie, n'avaient pas tardé à s'apercevoir que les images qu'ils rapportaient de leurs lointaines expéditions renfermaient bien, en effet, ce que nous avions annoncé, c'est-à-dire tous ou presque tous les éléments de mesure que l'on recueille si péniblement par les autres procédés, au point de les négliger bien souvent, *faute de temps,* et de ne plus savoir ensuite se reconnaître à travers les notes prises à la hâte dans la fièvre des itinéraires.

Si donc, même à présent et malgré ce qui se voit dans la plupart des autres pays de l'Europe et jusqu'en Amérique, il faudrait même dire surtout en Amérique, la Photographie est encore tenue à l'écart, on pourrait dire mise à l'index, en France et dans nos colonies par les topographes officiels, il est du moins consolant de savoir que les voyageurs scientifiques tendent de plus en plus à l'adopter pour exécuter les cartes des pays qu'ils parcourent.

C'était précisément à propos d'un voyage d'exploration

---

[1] Le maréchal Vaillant, le maréchal Niel, le général Noizet, le colonel du génie depuis général Bichot, le savant commandant Laurent, le commandant depuis général Blondeau, etc.

effectué, il y a un demi-siècle, en Abyssinie, par deux officiers d'état-major français, MM. Galinier et Ferret, que l'illustre Beautemps-Beaupré recommandait expressément l'emploi des *vues panoramiques* dont il avait fait lui-même un si fréquent et si merveilleux usage à la mer, à partir de 1791, pendant son voyage avec d'Entrecasteaux à la recherche de Lapérouse.

Il était sans doute intéressant de faire ce rapprochement, et je n'hésite pas à ajouter que, simple disciple de Beautemps-Beaupré, j'ai eu soin, dans mes deux Mémoires fondamentaux sur les applications de la chambre claire et de la Photographie au lever des plans, de déclarer que je conseillais l'emploi des vues pittoresques surtout dans le cas des reconnaissances; c'est aussi par là que j'avais commencé.

Mais, en continuant nos expériences, nous nous aperçûmes bientôt, mes collaborateurs et moi, que l'outil que nous avions entre les mains et dont tout le monde s'efforçait de perfectionner l'organe essentiel, donnait plus que nous ne lui avions d'abord demandé, et nous fûmes amenés à concevoir des espérances qui se trouvent pleinement réalisées aujourd'hui. Seulement, et en dépit des résultats vraiment remarquables auxquels étaient parvenus, dès 1861, les officiers de la division du Génie de la garde impériale (et je citerai, parmi eux, M. le lieutenant depuis lieutenant-colonel Sabouraud, auteur d'une très belle reconnaissance du Mont-Valérien et de ses environs), puis, de 1863 à 1871, la petite brigade composée du capitaine Javary et du garde du génie Galibardy, ce n'est pas en France qu'on a le plus profité, jusqu'ici, des précieuses propriétés de la Photographie.

Je crois inutile de m'arrêter sur les dates et sur l'importance des essais faits successivement en Allemagne, en Italie, en Autriche et récemment en Suisse ([1]), mais je constate, avec une véritable satisfaction, que l'application de la méthode pho-

([1]) Le lecteur qui voudrait se renseigner à ce sujet trouverait un historique détaillé de ces essais dans les *Annales du Conservatoire des Arts et Métiers*, 2e série, t. IV à VI. Il faudrait aujourd'hui mentionner beaucoup d'autres pays et jusqu'à la Nouvelle-Zélande dont l'arpenteur général vient de publier un Traité intitulé : *The application of Photography to topographic Surveying*, by George HEIMBROD. Déc. 1895. Dunedin; Stone, Son et Cie.

tographique au lever des plans a été faite sur la plus vaste échelle et avec un succès toujours croissant, dans un pays qui n'a cessé de conserver les plus grandes affinités avec le nôtre, au Canada.

Si une indisposition ne m'avait pas empêché de tenir l'engagement que j'avais pris avec la Société de Géographie de Paris, en me rendant au Congrès de Londres, je n'aurais pas manqué d'insister sur ce fait qui intéresse si directement le Gouvernement, les ingénieurs et les géographes anglais, et je me serais abstenu d'entrer dans les détails de ménage que j'ai donnés plus haut, assez discrètement d'ailleurs, et qui nous concernent exclusivement.

J'avais pensé, d'un autre côté, que la méthode photographique étant traitée dans une foule d'ouvrages et de brochures sur la *Métrophotographie,* la *Photogrammétrie* ou la *Phototopographie,* en français, en allemand, en italien et en anglais, je n'apprendrais pas grand'chose aux membres du Congrès en faisant devant eux un exposé devenu classique.

Il me sembla donc plus intéressant de démontrer, par l'*histoire des instruments, des méthodes et du dessin topographiques,* que l'utilisation des *vues panoramiques naturelles* pour la construction et l'illustration des plans topographiques est en quelque sorte le couronnement de tous les efforts qui ont été faits pour créer et perfectionner l'art de la Topographie.

En remontant aussi loin que les monuments et les traditions historiques le permettent, on reconnaît, et il n'y a pas lieu de s'en étonner, que le dessin pittoresque a joué pendant longtemps un rôle des plus importants dans cet art.

Quant aux instruments employés pour effectuer des mesures sur le terrain, ils ont été d'abord nécessairement très rudimentaires et les premiers géomètres ont dû s'ingénier beaucoup pour abréger leurs opérations et pour résoudre les problèmes, demeurés légendaires dans tous les temps, de l'évaluation des distances ou des hauteurs de *points inaccessibles.*

L'un des besoins les plus indispensables à satisfaire pour des réunions d'hommes a toujours été de trouver de l'eau et

souvent de la diriger. La recherche des sources et l'art des irrigations ont également donné naissance à des légendes persistantes, et dans notre langue, par exemple, les mots de *sorcier* et de *sorcellerie* n'ont peut-être pas d'autre origine ([1]).

Les opérations de captation, de nivellement et de construction de rigoles ou d'aqueducs exigeaient effectivement des facultés peu communes à des époques où la science de la Géologie et celle de l'Hydrologie n'existaient pas et où les accidents du terrain ne pouvaient pas être étudiés systématiquement comme aujourd'hui; enfin, la répartition des eaux pour la fertilisation du sol a toujours été l'une des tâches les plus délicates chez les peuples agriculteurs.

D'un autre côté, la pose des bornes des propriétés était, comme on le sait, accompagnée dans l'antiquité d'un appareil de solennité symbolisé par le dieu Terme.

D'une manière générale, on peut dire que les premiers arpenteurs et les premiers fontainiers ont été et devaient être considérés comme exerçant une véritable magistrature; mais l'opinion populaire allait plus loin et, depuis les Chaldéens qui cumulaient les fonctions de prêtres, d'astrologues et d'arpenteurs ([2]), jusqu'aux augures et, beaucoup plus tard, même à des époques assez rapprochées de nous, tous ceux qui se sont occupés d'opérations comportant l'usage d'instruments peu familiers au vulgaire, ont passé pour avoir des lumières supérieures ou même une puissance occulte.

En parlant des manufactures de luxe de l'État, un publiciste peu révérencieux, en général, il faut en convenir, exprimait récemment en ces termes l'idée qu'il fallait se faire de ces institutions et de quelques autres :

« Il est probable que les conseillers du souverain (Louis XIV)

---

([1]) Ce n'est pas l'opinion de Littré, mais il est permis d'être d'un autre avis que le célèbre lexicographe, et ce qu'il y a de certain, c'est que, dans le centre de la France, on prononce souvent *sourcier* pour *sorcier*.

([2]) On découvre tous les jours de nouvelles preuves de l'habileté des Chaldéens comme arpenteurs. Nous donnons un exemple de leur manière de dessiner les plans dans le deuxième Chapitre de ce Mémoire, mais les découvertes récentes de M. de Sarzec, à Tello, permettraient de prouver la très haute antiquité de la Topographie régulière. (*Voyez* la note de la p. 98.)

faisaient valoir auprès de lui, en l'engageant à se lancer dans ces entreprises, la convenance de former de bons ouvriers capables de concurrencer les artistes étrangers.

. . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . .

» Au fond, il n'y avait dans ces créations somptuaires qu'une pensée personnelle, de même que dans la fondation de l'Académie des Sciences il n'y avait d'autre but que de réunir *à peu de frais* des savants, afin de leur demander *gratis* leur opinion sur la partie technique des embellissements des résidences royales, et particulièrement sur *les adductions d'eau pour les fontaines, car les opérations de nivellement et de topographie constituaient, à cette époque, la branche cadette de la sorcellerie, l'alchimie étant l'aînée.* » (*Essai sur une restauration bourgeoise,* par P.-C. Laurent de Villedeuil, 2e fascicule; Paris, 1896).

Je laisse, bien entendu, à l'auteur la responsabilité de ses appréciations générales, mais l'observation qui les termine est de la plus parfaite exactitude, et il n'est pas moins certain, nous le verrons plus loin, que les plus savants académiciens furent, en effet, mis à contribution pour résoudre les questions d'*adduction d'eau* à Versailles, à Marly et dans les autres résidences royales.

Revenant aux instruments et nécessairement aux méthodes auxquelles ils se prêtaient ou qu'ils avaient suggérées, nous pouvons dire que le but que se proposaient, instinctivement ou de propos délibéré, ceux qui les ont imaginés successivement était presque toujours de réduire le nombre des mesures directes de longueur à effectuer sur le terrain.

Il est vraisemblable que pour mesurer les champs ou relever les sinuosités d'un chemin, d'un cours d'eau, les limites d'un enclos, d'un lac, etc., les premières méthodes, d'ailleurs indéfiniment pratiquées dans tous les temps et dans tous les pays, ont consisté à décomposer les polygones rectilignes en triangles dont on mesurait tous les côtés avec un *cordeau* ou une *chaîne,* ce qui a été la première espèce de *triangulation,* ou bien, dans le cas de sinuosités, à tracer des lignes droites qui les traversaient ou les côtoyaient et à employer la méthode

des *coordonnées rectangulaires*, en se servant de l'*équerre d'arpenteur* qui a sans doute été imaginée dans ce but.

Cette dernière méthode sert aussi à substituer aux polygones mixtilignes des polygones rectilignes dont les côtés sont alors autant de *bases* pour les *détails*. On peut enfin, dans ce cas et aussi dans le précédent où les périmètres étaient supposés rectilignes, éviter de pénétrer à l'intérieur des polygones pour mesurer les diagonales (ce qui, dans certains cas, serait impossible), en procédant par la *méthode des cheminements*, qui consiste à mesurer les côtés et les angles des périmètres.

L'évaluation de ces angles a pu et dû s'effectuer d'abord à l'aide de triangles auxiliaires de dimensions réduites dont on mesurait encore les trois côtés.

Ces pratiques primitives de l'arpentage, dans lesquelles on retrouve les germes des principales méthodes en usage, étaient d'une grande simplicité, et c'est pour cela, comme nous venons de le rappeler, qu'elles ont traversé tous les âges avec l'attirail, également très simple, du *cordeau* ou de la *chaîne* et de l'*équerre*.

Les Grecs, dont nous connaissons les Traités de Géométrie pratique, avaient imaginé, comme on le verra plus loin, d'ingénieux procédés, fondés sur les propriétés des triangles semblables, pour évaluer d'assez grandes distances en en mesurant de beaucoup plus petites (au moyen de *dioptres* et de *jalons* ou *mires verticales divisées*) et, en outre, des instruments comportant des *cercles divisés*, destinés dans le principe aux observations astronomiques.

Toutefois, il semblerait que les méthodes indiquées ci-dessus et familières aux arpenteurs, *décomposition en triangles* que nous avons qualifiée prématurément de *triangulations* et *cheminements*, ne se soient développées que plus tard, quand on s'avisa d'employer ces derniers instruments ou leurs analogues à la mesure ou au tracé des angles sur le terrain.

Quoi qu'il en soit, à partir de ce moment, les méthodes se transformèrent de la manière la plus avantageuse, au point de vue du temps à passer dehors, celle des triangulations, en particulier. Avec celle-ci, on ne mesura plus que rarement les longueurs des côtés et souvent on se contenta de celle d'un

côté qualifié de ***base de la triangulation,*** mais on mesura les angles et l'on calcula les longueurs des côtés des triangles, ou bien l'on obtint les angles graphiquement et les sommets de la triangulation furent déterminés par les rencontres des côtés prolongés. C'est ce dernier moyen de multiplier les points sur un plan qui est connu en Topographie sous le nom de ***méthode des intersections.***

La ***méthode des cheminements,*** au moyen de laquelle on détermine sur le plan les points où l'on s'arrête successivement et appelés ***stations,*** est aussi grandement facilitée par l'emploi de cercles divisés qui servent à mesurer les angles des polygones formés par les cheminements. Dans ce cas, toutes les distances des stations doivent encore être mesurées; mais, des stations combinées deux à deux, l'on peut opérer d'autres mesures d'angles ou tracer d'autres directions qui servent à déterminer, en plus ou moins grand nombre, de nouveaux points par la méthode des intersections.

Sans entrer dans de plus longues explications sur la série des opérations d'un lever de terrain d'une certaine étendue, sur la construction de ce que l'on appelle le ***canevas*** et sur celle des ***détails,*** nous nous contenterons de rappeler que la première, destinée à assurer l'exactitude de l'ensemble et à fournir des ***repères*** en nombre suffisant, s'exécute généralement à l'aide de cercles divisés et en calculant trigonométriquement les longueurs des côtés de la triangulation, puis que le lever des détails s'effectue soit par la méthode des intersections, soit par celle des cheminements, ou bien encore par celle du ***rayonnement,*** qui consiste à déterminer, d'une même station, un assez grand nombre de points, en mesurant ou en évaluant leurs distances à cette station et leurs directions rapportées à l'un des côtés qui y aboutissent ou à la méridienne qui passe par cette station. Il s'agit donc alors, on le voit, d'une ***méthode de coordonnées polaires*** qui n'empêche pas, d'ailleurs, de recourir en même temps à celle des coordonnées rectangulaires.

Sans oublier la chaîne et l'équerre, les instruments qui, depuis plusieurs siècles, ont été le plus en usage pour effectuer ces opérations de détail sont la ***boussole*** et la ***planchette*** qui,

dans bien des cas, aident aussi à la construction des canevas.

Si l'on excepte les mesures directes de longueurs opérées avec la chaîne ou quelquefois avec des règles, toutes les autres opérations comportent l'emploi d'instruments munis de *dioptres* ou d'*alidades* servant à fixer les directions des lignes de visée. Le principal perfectionnement apporté déjà depuis longtemps à l'ensemble de ces instruments a consisté dans la substitution fréquente des *lunettes* aux *alidades à pinnules*.

Un perfectionnement beaucoup plus récent et d'une très grande importance, au point de vue de la rapidité des opérations, a été l'introduction au foyer de ces lunettes, où se trouvait déjà une *croisée de fils* pour pointer sur les différents signaux, de deux autres fils horizontaux parallèles dont l'intervalle micrométrique rigoureusement déterminé permet d'évaluer *indirectement* les distances en faisant un *double pointé* et *deux lectures* sur une mire appelée *stadia*, placée au point dont on cherche la distance.

Telles étaient, en résumé, les conditions de plus en plus satisfaisantes, sous le double rapport de la précision et de la rapidité, dans lesquelles on pouvait opérer, quand, vers 1852, la Photographie commença à devenir praticable sur le terrain. Nous ne devons pas omettre de rappeler de nouveau qu'en nous inspirant des conseils et des exemples si convaincants de Beautemps-Beaupré, nous avions, même un peu avant cette date, proposé d'employer (à terre) *la chambre claire* de Wollaston convenablement modifiée pour dessiner des *vues de paysages géométriquement exactes* et montré, dès lors, tout le parti que l'on en pouvait tirer dans les reconnaissances. Nous avions encore, à la même époque (1850), ajouté à notre appareil une lunette pour dessiner des vues agrandies et nous procurer ainsi, dans certains cas, de précieux éléments de mesures [1].

Pour quiconque a bien voulu suivre le rapide exposé qui

---

[1] On verra plus loin, au Chapitre III de cette Notice, comment cette idée très simple, mais qui a cependant rendu les plus grands services pendant le siège de Paris par les Allemands, a été d'abord faussement attribuée à un inventeur attardé, puis assez mal comprise par l'un des hommes qui eussent dû le mieux l'apprécier. C'est elle, disons-le dès à présent, qui devait inspirer plus tard la *Téléphotographie*.

précède, le but que nous avons cherché à atteindre peut être facilement pressenti.

Les plus grands progrès de la Topographie avaient pour objet, nous venons de le voir, de supprimer ou de simplifier les mesures directes de longueur, et, pour y parvenir, les opérateurs, consciemment ou inconsciemment, ont fait de plus en plus usage de la Perspective. Leurs stations ne sont, en effet, rien autre chose que des *points de vue*, d'où ils dirigent des *rayons visuels* sur les points qu'ils veulent déterminer, et leur plus grand embarras est de distinguer ces points les uns des autres, après les avoir désignés par des lettres, des chiffres ou des appellations improvisées plus ou moins nettes, inscrites sur leurs carnets ou sur leurs planchettes. D'où l'impossibilité de multiplier ces rayons visuels, c'est-à-dire la nécessité de se contenter d'un petit nombre de *repères* obtenus par la méthode des intersections et par conséquent, au contraire, de multiplier les opérations de détail qui exigent nécessairement beaucoup de temps à passer sur le terrain et beaucoup de mesures de distances plus faciles à effectuer aujourd'hui, grâce à la stadia, mais pour lesquelles il faut toujours envoyer des porte-mires et attendre leur arrivée aux points à déterminer, sans parler des notes et des chiffres à inscrire.

Que l'on se représente actuellement une triangulation dont les sommets, peu nombreux mais bien choisis, ont servi de stations photographiques et les vues qui y ont été prises ; sans qu'il soit nécessaire d'y réfléchir longtemps, on comprendra que les conditions de l'opérateur qui saura s'en servir sont bien différentes de celles que nous venons d'analyser. On a employé quelquefois une expression familière que l'on nous permettra de reproduire parce qu'elle rend bien l'idée que l'on peut se faire de ces conditions : « Puisque l'opérateur a mis la nature dans son portefeuille (on a même dit dans sa poche), quand il sera rentré chez lui, il n'aura qu'à l'en faire sortir et à l'interroger à son aise comme il l'eût fait en plein air. »

Il suffit, pour que cela soit vrai, que l'opérateur en question ait eu le soin de prendre quelques renseignements indispensables, en très petit nombre d'ailleurs, à chaque station, et les vues naturelles répondent, en effet, avec précision à toutes ses questions.

On a peut-être remarqué que, dans tout ce qui précède, nous n'avons pas parlé du nivellement, et cependant, aujourd'hui, il ne saurait y avoir d'étude de terrain de quelque importance sans que le relief y soit figuré et coté aussi exactement que possible.

Nous ne pouvons, dans ce déjà trop long préambule, que rappeler très succinctement la nature des instruments spéciaux du nivellement, fondés tous nécessairement sur les effets de la pesanteur, la direction du fil à plomb ou l'état d'équilibre d'une petite masse liquide y fournissant spontanément l'indication qui doit guider l'observateur. On sait d'ailleurs qu'il y a deux modes d'opérer, l'un par *lignes de visée horizontales* qui constitue chaque fois le *coup de niveau* immédiat, et l'autre par *lignes de visée inclinées* au-dessus ou au-dessous de l'horizon. Dans ce cas, après avoir mesuré les angles, et les distances des points considérés étant supposées connues, les différences de niveau s'obtiennent par le calcul.

Il est aisé de reconnaître que la chambre noire organisée convenablement est encore l'instrument de nivellement qui donne les résultats les plus rapides, on pourrait dire les plus merveilleux par leur étendue.

Le *coup de niveau* qui, d'ordinaire, fournit le renseignement demandé pour un point isolé, sert, en effet, à tracer aussitôt la *ligne d'horizon* sur la photographie correspondante, déterminant ainsi toute la série des points du paysage qui se trouvent au même niveau que l'axe optique de l'instrument dont on connaît d'ailleurs la hauteur au-dessus de la station proprement dite. Et quant à tous les autres points du paysage, leur distance à la ligne d'horizon remplace l'élément angulaire visé ci-dessus, et le petit calcul nécessaire pour déterminer leur cote se fait à loisir, dans le cabinet, comme la construction de la planimétrie elle-même.

Sans anticiper sur les détails contenus dans le travail qui fait l'objet de la présente Notice, nous pouvons cependant ajouter que les vues panoramiques qui donnent immédiatement l'impression de la nature elle-même et qui, pour ce motif, ont été pendant longtemps conservées par les anciens topographes à côté et à l'appui de leurs plans et de leurs cartes, offrent de

plus, à présent que l'on cherche à représenter géométriquement le relief du terrain, le double avantage, indépendamment de celui que nous venons de rappeler, de faciliter singulièrement le tracé des *courbes de niveau* et de permettre *en tout temps* des vérifications qu'il serait impossible de faire subir aux plans levés par les méthodes ordinaires.

Nous n'insisterons pas, en ce moment, sur la question de savoir quelles sont les contrées qui, par leur nature, se prêtent plus ou moins bien à l'emploi de la méthode photographique. L'expérience seule peut décider jusqu'à quel degré, dans les pays de plaines, en tenant compte, dans certains cas, de l'existence d'édifices bien situés, les ondulations du terrain offrent encore des stations ou des points de vue tels qu'il puisse être avantageux de recourir à la Photographie pour les étudier; mais cette expérience est désormais superflue dans les pays accidentés et à plus forte raison dans les montagnes, ou plutôt elle a été faite sur la plus grande échelle et elle a démontré qu'il n'y avait pas de comparaison à établir entre la méthode photographique et toutes celles qui l'ont précédée.

Telles sont les considérations que je me proposais de faire valoir au Congrès de Londres en faveur de la méthode photographique et qu'il m'avait semblé utile d'appuyer de preuves présentées dans une sorte de revue rétrospective des instruments et des méthodes successivement mis en usage ainsi que des manières dont le dessin topographique a été envisagé depuis les époques les plus anciennes jusqu'à ce jour.

Le temps dont je disposais m'avait à peine permis de rédiger, trop à la hâte, le premier Chapitre de cette étude qui fut imprimé dans cet état ([1]) et envoyé au Congrès. La deuxième partie était à peine ébauchée et restée en manuscrit, et la troisième avait été remplacée par une série nombreuse de documents également envoyée à Londres.

Après avoir revu le premier Chapitre et l'avoir beaucoup amélioré sinon complètement achevé — car on ne saurait, en

([1]) *Annales du Conservatoire des Arts et Métiers,* 2$^{e}$ série, t. VI.

pareil cas, avoir la prétention de ne rien omettre ([1]), — j'ai poursuivi, dans le deuxième, mes recherches sur les transformations, on pourrait dire les vicissitudes du dessin topographique ([2]), et enfin j'ai essayé, dans un troisième et dernier Chapitre, de prévoir les conséquences de l'intervention désormais fatale, inéluctable de la Photographie.

Ce travail d'ensemble dont le programme n'avait pas même été ébauché jusqu'à présent, du moins à notre connaissance, m'a paru devoir contribuer à l'histoire et aux progrès d'un art qui a déjà été et qui sera de plus en plus utile à la fois aux géographes, aux ingénieurs, aux militaires et au public en général.

C'est ce qui m'a déterminé à le faire imprimer.

---

([1]) Les modifications que j'ai été conduit a faire subir à la rédaction de ce premier Chapitre sont si nombreuses et si importantes, que j'ai cru devoir les faire connaitre aux lecteurs des *Annales*, et c'est ce qui justifie cette seconde édition présentée dans le même recueil.

([2]) Malgré le soin apporté à la rédaction de ce deuxième Chapitre, il m'est arrivé de ne faire qu'un récit insuffisant de l'histoire de la découverte de la chambre obscure qui sera rectifié dans la publication que je me propose de faire de l'ensemble de cette étude. Je donne ici la nouvelle rédaction du passage dont il s'agit (p. 252, t. VII des *Annales*), avec l'indication des sources auxquelles j'ai puisé.

« En même temps que les premiers procédés dont nous venons de parler étaient imaginés, Léonard de Vinci et peut-être aussi un moine bénédictin, Dom Papnutio, observaient le phénomène que l'on produit en fermant les volets d'une chambre et en pratiquant dans l'un d'eux une petite ouverture par laquelle entre la lumière réfléchie des objets extérieurs et reçue sur un écran blanc où elle peint ces objets avec leurs couleurs naturelles, mais en donnant leur image renversée. Cette expérience est évidemment l'origine de la chambre obscure, et la Photographie sans objectif l'a remise en honneur; mais il faut bien convenir que, tout d'abord, les images obtenues étaient très pâles et leur renversement incommode.

» Le premier inconvénient fut corrigé par Cardan qui remplaça le simple trou pratiqué au volet par une lentille convergente et accrut ainsi beaucoup l'éclat des images. Enfin, un peu plus tard encore, le savant napolitain Porta obtint le redressement de l'image en faisant réfléchir les rayons lumineux à la surface d'un miroir concave convenablement placé. C'est surtout après ce dernier perfectionnement, effectué pendant la seconde moitié du XVI<sup></sup>e siècle, et qui a subi lui-même diverses modifications, que la chambre obscure, demeurée jusque-là un simple objet de curiosité, devint véritablement un instrument précieux pour les dessinateurs, et c'est ce qui explique aussi pourquoi, pendant longtemps, l'invention tout entière a été attribuée trop généreusement à Porta. On peut consulter, à ce sujet, LIBRI, *Histoire des Mathématiques en Italie*, tome IV, note II, et un article de M. Eug. MÜNTZ dans *Cosmopolis*, 1896. »

# CHAPITRE I.

## APERÇU HISTORIQUE SUR LES INSTRUMENTS ET LES MÉTHODES.

### I. — *Période gréco-romaine.*

Le besoin de diriger les eaux, avons-nous dit dans l'Avertissement, pour s'en débarrasser ou pour les utiliser et celui de limiter les champs ont sans doute fait imaginer de bonne heure des moyens de mesurer les différences de niveau et les distances de points plus ou moins éloignés les uns des autres, puis d'évaluer les superficies de terrains comprises entre des limites convenues qui furent l'origine de la propriété.

Toutefois on est réduit aux conjectures sur la nature des instruments et sur celle des opérations en usage chez les peuples de la haute antiquité, et il faut arriver à une époque avancée de la civilisation grecque pour être renseigné d'une manière un peu précise.

On ne pourrait douter que les Égyptiens [1] avaient d'ingé-

---

[1] Les Chaldéens, nous l'avons dit plus haut, étaient aussi d'habiles arpenteurs. On le savait depuis longtemps, mais les découvertes récentes de M. de Sarzec, communiquées à l'Académie des Inscriptions par M. Heuzey, viennent d'en fournir les preuves les plus irrécusables. Telles sont les plaquettes d'argile trouvées dans les fouilles de Tello, portant des plans gravés accompagnés de légendes de terrains, de champs avec leurs divisions, leurs orientations, leurs limites, les canaux qui les irriguent; on y trouve aussi des plans d'habitations, d'édifices sacrés, d'enceintes fortifiées analogues à celle que porte la statue de Goudéa et que le lecteur trouvera dans le deuxième Chapitre de ce travail. D'après MM. de Sarzec et Heuzey, ces documents graphiques et les nombreux contrats qui les accompagnent formaient un véritable cadastre des propriétés. Il est sans doute également intéressant de savoir que, jusque dans le Nouveau-Monde, chez des peuples considérés à tort pendant longtemps comme des *sauvages* et dont la civilisation, au contraire, déjà avancée et très intéressante, a été brusquement interrompue par

nieux instruments de mesure et d'observation qu'ils ont transmis aux Grecs, mais ce que l'on sait bien, c'est que ceux-ci ont amélioré tout ce qu'ils tenaient de la tradition égyptienne, en fait d'Astronomie et de Géométrie, et qu'ils ont créé définitivement ces deux sciences.

Il existe à la Bibliothèque Nationale de Paris d'assez nombreux documents sur la Géométrie pratique des Grecs, dont la traduction a été faite en grande partie par M. A.-J.-H. Vincent, de l'Académie des Inscriptions et Belles-Lettres, et publiée par lui en 1858 (¹).

Au nombre de ces traités, celui de Héron d'Alexandrie, qui, d'après l'éminent traducteur et commentateur, remonte au 1er siècle avant notre ère, est le plus complet et paraît avoir joué, pour l'enseignement de la Géométrie pratique, le rôle de l'Ouvrage fondamental d'Euclide pour la Géométrie élémentaire.

Nous y puiserons largement dans l'exposé qui va suivre et qui donnera, nous l'espérons, une idée assez exacte des ressources dont disposaient, il y a plus de deux mille ans, les ingénieurs civils et les ingénieurs militaires qui avaient, les uns, à exécuter des travaux souvent difficiles, comme le percement et l'aération de galeries souterraines, le tracé des aqueducs, etc., les autres, à reconnaître les abords d'une place qu'ils assiégeaient ou à exécuter la carte des pays qu'ils parcouraient, en prenant part aux expéditions des conquérants.

Voici l'analyse très sommaire, mais que nous croyons toutefois suffisante, du Traité de Héron :

Pour évaluer les distances, indépendamment de la mesure au pas pratiquée systématiquement chez les anciens Égyptiens par des opérateurs connus sous le nom de *bimatistes*, les Grecs

---

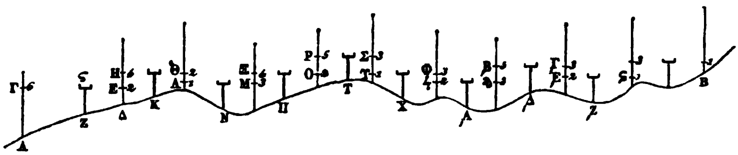
des conquérants avides et souvent cruels qu'aveuglaient leurs succès inespérés, chez les Aztèques, en particulier, du temps de Cortez, il y avait des arpenteurs (*amanteques*) plus habiles que ceux des Espagnols. Ne pouvant donner ici les preuves nombreuses de l'activité intelligente d'une race digne d'un meilleur sort, nous nous contenterons de dire qu'au nombre des institutions mexicaines, en avance sur celles de bien des pays de l'Europe, à la même époque, on trouvait jusqu'à des vérificateurs des poids et mesures.

(¹) *Extraits des manuscrits relatifs à la Géométrie pratique des Grecs* (Paris, Imprimerie impériale; 1858).

employaient la *chaîne* ou plutôt le *cordeau* divisé en coudées et jusqu'à un *odomètre* automatique tout à fait analogue à ceux qui ont été imaginés bien longtemps après et dont ils se servaient même pour mesurer les parcours en bateau.

Pour évaluer les différences de niveau (*fig.* 1) entre deux points plus ou moins éloignés l'un de l'autre, ils avaient un *niveau d'eau* semblable au nôtre, accompagné d'une *mire*

Fig. 1.



Opération du nivellement.

composée d'une tige verticale divisée et d'un *voyant* mobile, manœuvré à l'aide d'une cordelette et d'une petite poulie de renvoi placée à la partie supérieure de la tige.

Pour relever les profils de terrain dans une direction convenablement tracée, ils avaient rencontré la méthode si simple, et toujours en usage, des visées horizontales en avant et en arrière, de stations intermédiaires entre deux points consécutifs du profil.

La mesure des surfaces à contours polygonaux ou même curvilignes était facilitée par l'emploi de *jalons* et d'une équerre d'arpenteur (*groma*) portée par un pied (*ferramentum*), à l'aide de laquelle, et en recourant à la méthode des perpendiculaires ou coordonnées rectangulaires, on réunissait aisément tous les éléments nécessaires à la construction du plan.

Dans le cas d'une limite polygonale à côtés rectilignes, la figure était divisée en triangles par des diagonales et la surface de chaque triangle était calculée, à l'aide d'une formule, en fonction des trois côtés.

A peine est-il nécessaire d'ajouter que les instruments de dessin, à l'usage des géomètres et des architectes anciens, étaient comme aujourd'hui la *règle* (divisée), l'*équerre triangulaire* [peut-être celle que l'on construisait simplement et

sûrement, d'après Pythagore [1], avec des côtés dont les longueurs étaient proportionnelles aux nombres 3, 4 et 5] et le *compas*.

Nous avons dit que les ingénieurs avaient recours à la Géométrie pratique pour résoudre des problèmes parmi lesquels nous citerons seulement ceux que l'on trouve toujours indiqués dans les Ouvrages élémentaires, à savoir : la mesure de la distance d'un point inaccessible, celle de la largeur d'une rivière sans la traverser, la détermination de la hauteur d'une montagne ou d'un édifice plus ou moins éloigné dont on ne peut pas s'approcher, etc.

Pour résoudre ces problèmes et bien d'autres encore exposés par Héron dans son livre, on se servait d'un instrument que l'on qualifierait aujourd'hui d'universel et désigné alors sous le nom de *dioptre* (*fig.* 2), de celui de l'organe qui servait à viser appelé *mediclinium* par les Latins et, plus tard, *alhidât* par les Arabes, dont nous avons fait *alidade*.

Le dioptre ou la dioptre [2] se composait essentiellement d'une alidade à pinnules portée par une colonne rendue verticale au moyen d'un fil à plomb, qui reposait elle-même sur un trépied à branches très courtes; l'alidade pouvait prendre toutes les directions, grâce à une disposition mécanique ingénieuse qui permettait de lui donner les deux mouvements de rotation autour d'un axe horizontal et autour d'un axe vertical.

La dioptre avait des usages nombreux; elle pouvait servir à niveler et, pour cela, l'alidade arrêtée dans la position horizontale recevait un tube à deux branches verticales en verre logé entre les pinnules; l'alidade ne devait alors se mouvoir qu'autour de l'axe vertical.

En supprimant le niveau et en rendant sa liberté à l'alidade, on pouvait viser dans toutes les directions, et, au moyen de jalons disposés dans le voisinage de l'instrument dont les distances étaient mesurées avec soin ainsi que les hauteurs

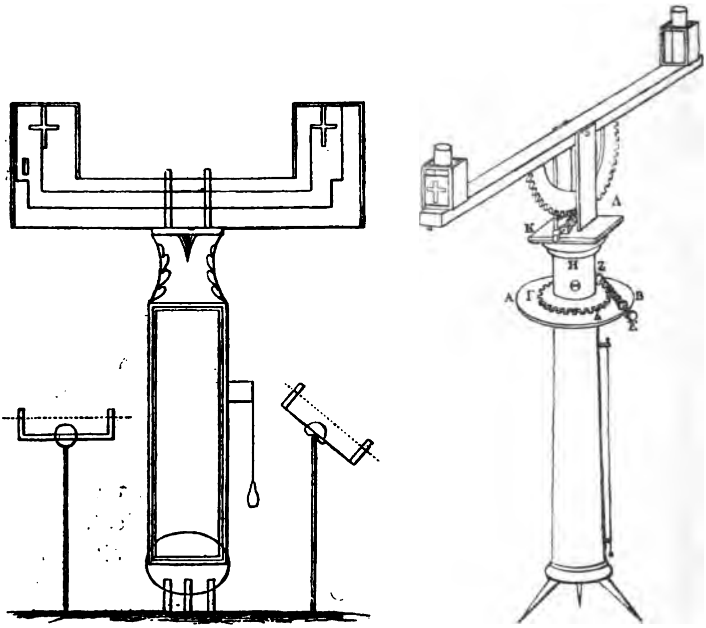
---

(1) Vitruve en parle en rappelant l'admiration qu'avait excitée cette construction.

(2) Le titre de l'Ouvrage de Héron d'Alexandrie était : *Traité de la Dioptre*, Περι διοπτρας.

où ils étaient rencontrés par les rayons visuels, on parvenait à résoudre la plupart des problèmes de Géométrie pratique par la théorie des triangles semblables et *sans mesurer d'angles;* mais en y ajoutant un plateau circulaire divisé en degrés et fractions de degré autour du centre duquel tournait

Fig. 2.



Dioptre d'après le manuscrit original et restitution du traducteur.

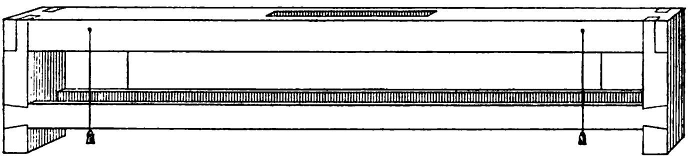
l'alidade, la dioptre pouvait encore servir à mesurer les distances angulaires de deux astres, les diamètres apparents de la Lune et du Soleil, etc., c'est-à-dire qu'elle était également à l'usage des astronomes ([1]), lesquels ne pouvant pas songer,

([1]) Hipparque avait fait usage d'une dioptre spécialement consacrée à ce genre d'observations. La dioptre d'Hipparque est décrite par Proclus et par Théon; elle est représentée dans une édition de ce dernier auteur, de 1538, mais elle n'a pas pour nous le même intérêt que la dioptre des arpenteurs.

en général, à évaluer des distances linéaires, avaient été les premiers à recourir à la division de la circonférence dont les arpenteurs et les géodésiens devaient plus tard tirer eux-mêmes le plus grand parti.

Les Romains, qui empruntèrent aux Grecs leurs méthodes et leurs instruments, ne paraissent avoir rien ajouté d'essentiel à un art qui devait cependant leur être si utile (1). C'est à peine si l'on trouve à mentionner, d'après Vitruve, un niveau d'eau à simple cuvette creusée dans une règle assez longue posée sur le sol, qui pouvait aussi fonctionner à l'aide de perpendicules, désigné sous le nom de *chorobate* (*fig.* 3), dont l'usage

Fig. 3.



Chorobate restitué par Perrault d'après la description de Vitruve.

ne devait pas être, à beaucoup près, aussi commode que celui de la dioptre horizontale et de la mire à voyant.

Enfin le niveau de maçon paraît avoir été connu de toute antiquité. Seulement on le trouve d'abord décrit ou représenté sous la forme d'un triangle équilatéral (et non rectangle isocèle, comme on le construit le plus souvent aujourd'hui), mais toujours avec un fil à plomb attaché à l'un des trois sommets et un trait de repère au milieu du côté opposé.

C'est là à peu près tout ce que nous savons des instruments et des méthodes qui ont permis aux Grecs et surtout aux Romains d'accomplir les grands travaux dont les imposants vestiges nous donnent une si haute idée.

(1) Il ne s'agit, dans ce Chapitre, que de l'histoire des instruments; nous avons donc cru pouvoir reporter au Chapitre suivant une note qui se rapporte à l'organisation très remarquable des *agrimensores* et qui explique la perfection du plan de Rome du temps de Septime Sévère et à celle des *castrorum metatores* qui ont rendu tant de services aux armées de la République.

## II. — *Digression à propos des instruments astronomiques dans l'antiquité.*

Nous avons tenu, dans cette étude, à ne recourir qu'à des documents authentiques, et l'Ouvrage de Héron nous a mis à même, en effet, de préciser l'état auquel était parvenu l'art dont nous cherchons à retracer l'histoire à une époque également bien déterminée ([1]).

En décrivant la dioptre, nous avons dit, toujours d'après Héron, que l'on y avait ajouté un cercle divisé à l'usage des astronomes. Si l'on admet la restitution proposée par M. Vincent [laquelle ne diffère de celle du savant italien Venturi que par la suppression d'un plateau circulaire supérieur ([2])], il est impossible de ne pas songer aussitôt que les deux axes de rotation eussent pu porter des cercles divisés, puis de concevoir des index disposés sur les supports fixes de façon à permettre de mesurer à la fois les angles verticaux et les angles horizontaux décrits par la dioptre. En un mot, cet instrument eût été ou eût pu devenir facilement un *théodolite*. Mais rien n'autorise à poursuivre jusqu'au bout cette hypothèse, et ce qu'il y a de certain, c'est que la dioptre décrite par Héron ne se retrouve pas explicitement mentionnée par Ptolémée au nombre des instruments dont il faisait usage et qui furent imités plus tard dans l'Europe occidentale, non seulement par les astronomes, mais par les voyageurs, les géographes et les arpenteurs.

Après le Traité de Héron, c'est, en effet, dans l'*Almageste* de Ptolémée qu'il faut chercher d'autres indications concernant les instruments de mesure et d'observation des anciens, en y joignant celles que l'on trouve, à une date antérieure, dans Vitruve, principalement pour ce qui regarde la Gnomonique ([3]),

---

([1]) Nous répétons, d'après M. A.-J.-H. Vincent, que le Traité de Héron date du Ier siècle où même de la seconde moitié du IIe siècle avant notre ère.

([2]) *Voyez* l'Ouvrage déjà cité de A.-J.-H. Vincent, p. 182.

([3]) Livre IX de l'*Architecture* de VITRUVE, traduction de PERRAULT.

et plus tard dans Proclus, Philoponus et Théon ([1]) qui donnent quelques explications un peu plus détaillées que celles de Ptolémée.

Toutefois, il est bien difficile de se prononcer, d'après ces différents auteurs, sur les époques de la découverte des premiers instruments astronomiques dont le plus ancien est sûrement le *gnomon* ([2]).

Nous n'avons pas à nous engager dans l'examen des textes et de toutes les interprétations qui en ont été données, d'après lesquelles le gnomon, connu de très ancienne date des Chaldéens ou des Babyloniens ([3]), l'aurait été également des Égyptiens, des Chinois, des Indiens et même des Aztèques et des Incas. Cet appareil si simple devait, en effet, s'imposer en quelque sorte à tous les peuples en voie de civilisation et qui, par conséquent, éprouvaient le besoin de mesurer le temps.

La division de la durée du jour apparent, entre le lever et le coucher du Soleil, en douze heures dites *temporaires* ([4]), et celle de la circonférence en 360 degrés, cette dernière se rattachant évidemment à la durée de l'année solaire de 365 jours et une fraction, viennent des premiers peuples qui ont adopté cette année solaire et nous ont été transmises par les astronomes d'Alexandrie qui, pour faciliter leurs calculs et en doublant la première, ont divisé le jour entier en vingt-quatre heures égales ([5]).

On sait qu'en dépit des simplifications qui résulteraient de l'emploi du système décimal pour la division du temps et de la circonférence, les nombres dont il s'agit (12 et 360), qui appartiennent au système duodécimal et jouissent tous les deux

([1]) *Procli Diadochi Hypotyposis astronomicarum positionum*, GEORGIO VALLA PLACENTINO *interprete*, Cap. II, V, VI, VII, etc.

([2]) *Voir*, à la fin de ce Chapitre, une note à ce sujet.

([3]) Les Grecs et les Romains désignaient les astrologues sous le nom de *Chaldæi*, les Chaldéens étant historiquement, d'ailleurs, une sorte de collège de prêtres savants en Babylonie.

([4]) D'après Hérodote, les *douze parties du jour*, le *pôle* et le *gnomon* venaient des Babyloniens; le pôle désignait, croit-on, le cadran solaire hémisphérique creux ci-après ou *scaphé*.

([5]) Sur les anciens cadrans solaires grecs, romains, phéniciens, on ne trouve que la division en heures temporaires; les Arabes ont été les premiers à y tracer les lignes d'heures égales.

de l'importante propriété d'avoir chacun, au rang qu'il occupe dans la série générale, le plus grand nombre de diviseurs, sont encore généralement en usage (1).

Si nous donnons ces détails, c'est que les instruments dont il nous reste à dire quelques mots ont été imaginés surtout en vue de la division du jour en heures, de l'étude de la marche angulaire apparente du Soleil, ainsi que des autres astres sur la sphère céleste et que ceux qui en sont dérivés ont conservé la trace de leur origine.

Quoique le nom de *Gnomonique* ait été donné à l'art de construire les cadrans solaires, on ne saurait douter que les autres instruments imaginés et employés par les astronomes se rattachent plus ou moins directement au gnomon.

Ainsi, après les premières observations spontanées du déplacement de l'ombre d'une tige verticale sur le sol, il était naturel que l'on songeât à suivre les mouvements du Soleil dans une coupe ou *scaphé*, image retournée de l'hémisphère céleste, le gnomon devenant un rayon vertical avec son sommet au centre commun dont l'ombre sur les parois du scaphé figurait chaque jour la marche du Soleil (*fig.* 4).

Or c'est cet appareil, *scaphé*, *hemicyclium* ou *hemispherium*, souvent attribué au Chaldéen Bérose (2), qui a conduit à la construction des cadrans solaires sphériques, si communs dans l'antiquité, et il est aussi permis de supposer, d'après la *fig.* 4 qui le représente, qu'il a inspiré l'idée de l'emploi de cercles isolés diversement orientés, anneaux ou armilles verticales, équinoxiales, etc., et de leur assemblage formant la *sphère armillaire* (*fig.* 5).

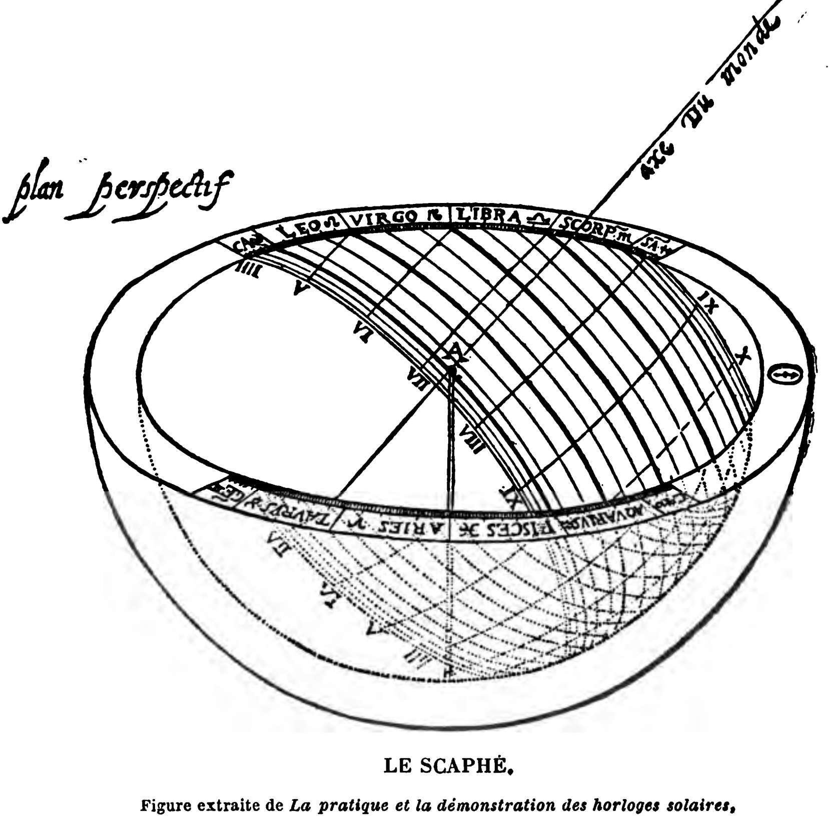
La considération de l'axe du monde dans la sphère complète ou *solide* ou dans la sphère armillaire avait pu, à son tour,

(1) Parmi les diviseurs de 360, le nombre 30 était sensiblement celui de la durée, en jours solaires, de la révolution synodique de la Lune, et la division de l'écliptique et du zodiaque en arcs ou en signes égaux en était résultée naturellement et faisait réapparaître le nombre 12 si apprécié par les anciens.

(2) Vitruve dit que Bérose inventa l'*hemicyclium in quadrato*, ce qui est, à proprement parler, le cadran solaire sphérique dont on a retrouvé un grand nombre d'exemplaires conservés dans nos musées, et Aristarque, de Samos, l'*hemispherium*, c'est-à-dire le scaphé.

contribuer au perfectionnement des cadrans solaires, plans, horizontaux et verticaux, ces derniers dans les diverses orientations (ainsi les huit faces de la tour des Vents, à Athènes),

Fig 4.



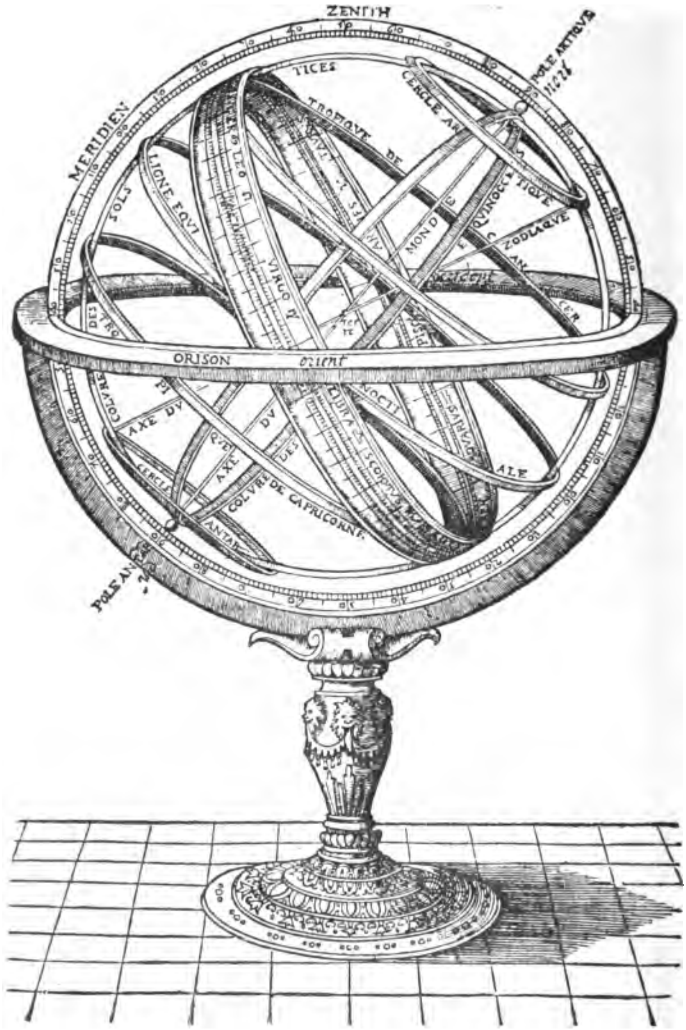

LE SCAPHÉ.

Figure extraite de *La pratique et la démonstration des horloges solaires*, de SALOMON DE CAUS.

par la substitution du style parallèle à cet axe au gnomon vertical ou horizontal.

D'un autre côté, l'observation journalière de la marche de l'ombre du sommet du gnomon sur le sol horizontal, après avoir donné naissance à la méthode si souvent employée même

Fig. 5.




La Sphère armillaire.

Figure extraite de ***La pratique et la démonstration des horloges solaires***, de **Salomon de Caus.**

aujourd'hui des hauteurs correspondantes du Soleil pour le tracé de la méridienne ([1]), pourrait bien avoir aussi suggéré l'étude de la forme, de la nature et des propriétés des célèbres sections coniques et l'idée des projections.

Enfin, la longueur incessamment variable de l'ombre d'un style vertical sur un plan horizontal et celle de l'ombre d'un style horizontal sur la verticale qui se trouve dans le même plan que le centre du Soleil [*qualis est umbra stili in horario cylindrico* ([2])] et qui sont la tangente de la distance zénithale et celle de la hauteur du Soleil (ou la cotangente de la première), était un phénomène trop frappant pour n'avoir pas donné matière à d'importantes réflexions de la part des anciens géomètres; mais on sait que ces quantités furent introduites dans le Calcul trigonométrique seulement par les Arabes sous les noms d'*ombre droite* (*umbra recta*) et d'*ombre verse* (*umbra versa*), à partir du x^e^ siècle.

La Géométrie et la Trigonométrie comme l'Astronomie ont donc une parenté étroite avec la Gnomonique, vraisemblablement la plus ancienne des sciences d'observation; mais nous ne voulons pas insister plus longtemps sur ces rapprochements, notre but ayant été simplement d'indiquer l'origine des instruments dont les anciens astronomes ont fait usage et dont plusieurs ont été adaptés, comme nous le verrons plus loin, aux besoins de la Topographie.

Indépendamment de la dioptre ordinaire et d'une autre dont la pinnule extrême évidée circulairement était mobile et pouvait se rapprocher ou s'éloigner de l'œil, de manière à faire varier le diamètre apparent de son ouverture, ces instruments

---

([1]) Cette méthode, décrite par Proclus, a été quelquefois désignée sous le nom de *cercle indien*, d'après les Arabes, mais M. L.-Am. Sédillot estime que le cercle indien était, en réalité, un instrument matériel distinct du gnomon. Ajoutons, à ce propos, que les Arabes ont eux-mêmes perfectionné le gnomon en armant son sommet d'une plaque percée d'une ouverture circulaire qui donne une image du Soleil beaucoup mieux définie que l'ombre de ce sommet accompagnée d'une pénombre.

([2]) Allusion à une sorte de petite montre solaire très ingénieuse qui se trouve encore aujourd'hui entre les mains des pâtres des Pyrénées, qui la tiennent sans aucun doute des Arabes, très amateurs des instruments portatifs dont ils faisaient le plus fréquent usage. (*Voyez* le Paragraphe suivant).

peu nombreux, mais dont les noms ont varié en donnant souvent lieu à des confusions, étaient les *armilles* ou anneaux circulaires évidés avec ou sans alidade, la *sphère armillaire* composée de semblables anneaux, au nombre de cinq ou même de six ou sept, énumérés par Ptolémée ([1]), l'*astrolabe* de Hipparque, qui n'en devait guère différer et qui est encore qualifié plus justement du nom d'*instrument des armilles* (*instrumentum armillarum*), les *règles parallactiques* ou *triquetrum* de Ptolémée, enfin son *quart de cercle* tracé sur une planche orientée dans le plan du méridien, que l'on a considéré quelquefois comme l'ancêtre du quart de cercle mural des Arabes et de Tycho-Brahé, mais dont l'usage paraît avoir été limité à la mesure de l'obliquité de l'écliptique, effectuée habituellement au moyen du gnomon.

Si l'on excepte ce dernier (le gnomon) dont l'antiquité est hors de doute, les divers instruments que nous venons d'énumérer sont tous attribués aux plus célèbres astronomes d'Alexandrie; toutefois, il est à présumer que d'autres, en même temps ou même avant eux, en avaient imaginé de leur côté. On peut voir, par exemple, dans l'*Arénaire,* qu'Archimède ([2]) évaluait les diamètres apparents de la Lune et du Soleil au moyen d'un petit cylindre vertical qu'il éloignait ou rapprochait de son œil (comme la pinnule mobile dont nous avons parlé plus haut), et l'on sait que ce grand homme ne s'était pas contenté de concevoir et de construire une sphère céleste avec ses différents cercles, mais qu'il y avait mis les astres en mouvement ([3]).

Quoi qu'il en soit, les instruments décrits par Ptolémée et par ses commentateurs ont d'abord servi aux astronomes arabes, qui les ont perfectionnés et modifiés, et plus tard aux

---

([1]) Les armilles étaient disposées dans les plans où l'on voulait observer : équateur, écliptique, méridiens, colures, etc., et, dans certains cas, quand il s'agissait du Soleil, on observait l'instant où l'ombre du demi-cercle antérieur se projetait sur le demi-cercle postérieur, ce qui dispensait de l'emploi d'une alidade.

([2]) Archimède a surtout fait ses découvertes à Syracuse, mais, comme la plupart des savants de son temps (IIIe siècle avant J.-C.), il avait fréquenté l'École d'Alexandrie, à laquelle il se trouve ainsi rattaché.

([3]) Nous pensons qu'on ne nous saura pas mauvais gré de reproduire

astronomes de tous les pays de l'Europe, qui les ont aussi appliqués à l'art de mesurer les distances terrestres et les hauteurs, en un mot aux différents besoins de la Topographie.

Il faut encore ajouter que l'un des principaux problèmes qui intéressent à la fois les astronomes et les géographes, celui de la projection de la sphère sur un plan, avait été résolu de plusieurs manières par les géomètres grecs. La sphère solide et la sphère armillaire répondaient sans doute aux besoins immédiats des astronomes, mais ceux-ci n'avaient pas tardé à sentir qu'il serait souvent utile de pouvoir représenter sur une surface plane les cercles auxquels ils rapportaient les positions relatives des étoiles et les déplacements du Soleil, de la Lune et des planètes.

La projection gnomonique avait dû se présenter la première à l'esprit des astronomes, mais on imagina encore de bonne heure les projections orthographique et stéréographique, dues peut-être toutes les deux à Hipparque et permettant de résoudre graphiquement les problèmes de Trigonométrie sphérique considérés en Astronomie. La première, sous le nom d'*analemme,* était bien connue de Vitruve qui l'employait dans la construction des cadrans solaires, et Ptolémée a signalé

---

ici les vers de Claudien qui rappellent l'admiration produite par l'œuvre d'Archimède :

> *Jupiter in parvo cùm cerneret æthera vitro,*
> *Risit, et ad Superos talia dicta dedit:*
> *Huccine mortalis progressa potentia curæ?*
> *Jam meus in fragili luditur orbe labor.*
> *Jura poli, rerumque fidem, legesque Deorum*
> *Ecce Syracosius transtulit arte senex.*
> *Inclusus variis famulatur spiritus astris,*
> *Et vivum certis motibus urget opus.*
> *Percurrit proprium mentitus Signifer annum,*
> *Et simulata novo Cynthia mense redit.*
> *Jamque suum volvens audax industria mundum*
> *Gaudet, et humana sidera mente regit.*
>
> (Épigr. XVI.)

On voit que l'idée des appareils uranographiques mécaniques date de loin, et l'on sait que leur construction a souvent exercé le génie inventif des plus habiles artistes et des plus grands savants, témoin le *planétaire de Huygens* que possède le Conservatoire des Arts et Métiers.

plus tard les propriétés si précieuses de la seconde, sur laquelle, notamment, tous les cercles de la sphère sont encore représentés par des cercles, en la désignant sous le nom de *planisphère* [1]. On sait que cette projection devait être par la suite généralement adoptée pour aider à représenter aussi bien le globe terrestre (mappemonde) que la sphère céleste. Nous verrons qu'on l'a aussi appelée *astrolabe*.

Nous terminerons cet historique sommaire de la découverte des instruments d'observation dans l'antiquité en insistant sur ce qu'il a toujours existé une grande obscurité sur les dates et sur les noms des véritables auteurs des premières inventions [2]. Dans le cas dont il s'agit, selon la remarque très judicieuse de Libri, les Ioniens et les Alexandrins auxquels on doit les travaux les plus remarquables et les découvertes les plus importantes en Géométrie et en Astronomie avaient certainement fait aux Chaldéens et aux Égyptiens beaucoup d'emprunts dont ils avaient négligé de rappeler l'origine.

Cette tendance à oublier les antériorités est souvent poussée jusqu'à la naïveté. Ainsi, toujours d'après Libri, les Grecs faisaient honneur de l'invention de l'équerre et du niveau, à la fois, à un architecte du temple d'Ephèse, c'est-à-dire à un des leurs, tandis que la nécessité avait dû certainement faire imaginer ailleurs ces instruments fondamentaux bien des

---

(1) Le texte grec du petit Traité de Ptolémée sur le planisphère ne nous est pas parvenu. La version arabe, assez obscure, commentée elle-même par Maslem, son auteur, a été traduite en latin et publiée au XVIe siècle avec d'autres commentaires et des éclaircissements par Jordan et Commandin d'Urbin. L'Ouvrage complet a pour titre : *Ptolemæi Planispherium. Jordani Planispherium. Federici Commandini Urbinatis in Ptolemæi Planispherium commentarius* (Aldus, Venetis; MDLVIII). Il en existe, à la Bibliothèque de l'Institut, un exemplaire accompagné de notes marginales de la main de Delambre. Ptolémée a désigné aussi les deux projections orthographique et stéréographique sous le nom d'*analemme;* il a donné plusieurs autres systèmes de représentation du réseau des méridiens et des parallèles pour les cartes géographiques dont nous n'avons pas à nous occuper ici.

D'après des lettres de Synésius, la célèbre Hypathie avait aussi imaginé un *planisphère* et un *astrolabe*. Il faut entendre ici le mot planisphère, ainsi qu'on le fait depuis longtemps, comme désignant, en général, les projections de la sphère sur un plan, et celui d'astrolabe comme se rapportant à un instrument destiné à la mesure de la hauteur des astres.

(2) *Voir*, à la fin de ce Chapitre, la note déjà mentionnée.

siècles auparavant [1]. Mais c'est par milliers qu'il faudrait relever les prétentions et les bévues de ce genre, volontaires ou involontaires, chez les anciens comme chez les modernes, ces derniers bien moins excusables avec toutes les sources d'information dont ils disposent. Cela rend la tâche que nous avons entreprise extrêmement délicate et nous obligera souvent à ne présenter qu'avec réserve les résultats de nos recherches.

## III. — *Période et influence arabes.*

Après le démembrement de l'empire romain, les Arts et les Sciences disparurent à la fois de l'Occident où ces dernières n'avaient, d'ailleurs, jamais été en bien grand honneur [2]. A Alexandrie cependant, la tradition, entretenue pendant près de huit siècles avec tant d'éclat, persévérait encore et, d'un autre côté, les savants grecs attirés en même temps que les artistes à Constantinople, à la cour des empereurs d'Orient, y avaient transporté cette même tradition avec les ouvrages de leurs prédécesseurs. Mais l'époque des grands travaux et des grandes découvertes qui ont illustré la cité gréco-égyptienne était passée et ne devait plus revenir.

Une nation jeune, enthousiaste, pleine de foi dans son avenir, celle des Arabes, après avoir conquis la Perse, la Palestine, la Syrie et l'Égypte, d'où elle devait bientôt s'étendre dans tout le bassin de la Méditerranée, allait heureusement, grâce aux nobles inspirations de plusieurs de ses éminents khalifes, succéder aux Grecs dans la culture des Sciences d'observation et même des Sciences exactes.

---

[1] Comment concevrait-on, par exemple, que les immenses édifices de l'antique Égypte, ceux de Babylone, de Ninive, de Persépolis, de Suse, etc. eussent été élevés sans le secours de l'équerre et du niveau?

[2] Pline le naturaliste, le géographe Strabon et quelques autres encore auront toujours leur place marquée dans l'histoire des Sciences naturelles, mais, sans excepter Vitruve dont les connaissances en Mathématiques ne semblent pas avoir été très étendues, on ne trouve à citer chez les Romains ni un astronome ni un géomètre. Pour la réforme du calendrier, Jules César avait été obligé de s'adresser à l'Alexandrin Sosigène.

On sait, d'un autre côté, combien cette race merveilleusement douée a contribué à la renaissance des lettres, et les preuves multipliées qu'elle a données de son goût pour les arts dans ses monuments, ses costumes, ses armes, ses ustensiles et jusque dans la construction de ses instruments scientifiques, lui assignent également un rang élevé dans l'histoire de la civilisation.

Du VIII<sup>e</sup> au XIII<sup>e</sup> siècle, en Asie, l'École de Bagdad; en Espagne, celles de Cordoue, de Tolède, de Séville, de Grenade; en Afrique, celles de Tlemcen et de Maroc, pour ne citer que les plus importantes, allaient, pour ainsi dire, continuer l'École d'Alexandrie [1].

Partout des observatoires, des bibliothèques, des cours publics étaient fondés, et rien n'était épargné pour y attirer de savants observateurs, de savants professeurs et de nombreux élèves auxquels on commençait par enseigner les *Mathématiques;* en un mot, dans un temps où l'ignorance et les disputes religieuses menaçaient de détruire l'œuvre des grands esprits philosophiques de la Grèce et d'égarer la raison humaine [2], les Arabes, sans échapper à quelques-unes des illusions des anciens et à d'autres qui leur étaient propres, celles de l'Astrologie et de l'Alchimie, trouvaient dans les Sciences positives un guide précieux qui devait bientôt leur donner sur les autres nations une avance considérable qu'ils conservèrent pendant presque toute la durée du moyen âge.

Sans vouloir nous arrêter trop longtemps, à propos des instruments modestes dont nous recherchons les origines, sur l'histoire scientifique des Arabes, on nous permettra de rappeler quelques faits et quelques dates qui se rapportent, croyons-nous, très directement à notre sujet.

---

[1] On a même fait justement remarquer que la substitution des sinus aux cordes et l'introduction des tangentes et des sécantes en Trigonométrie ainsi, d'ailleurs, que celle des chiffres indiens à la place des lettres dont se servaient les Grecs et les Romains avaient donné, sous le rapport de la facilité des calculs, un immense avantage aux écoles arabes.

[2] Il suffirait de citer l'odieux attentat dont la célèbre Hypathie, fille de Théon, l'un des derniers astronomes recommandables d'Alexandrie, fut victime, malgré sa beauté et ses grandes vertus, uniquement parce qu'elle était trop au-dessus de la foule, aveugle et fanatisée, par sa science et sa philosophie.

Dès la fondation de Bagdad, les premiers khalifes avaient demandé aux empereurs d'Occident des livres et même des savants grecs pour y enseigner les Mathématiques [1]. Ils en avaient fait, dans certains cas, une condition de paix et un *casus belli;* en 829, par exemple, le refus fait par l'empereur Théophile d'envoyer à Bagdad le mathématicien Léon, demandé par Almamoun, aurait été la cause principale d'une guerre qui dura plus de dix ans.

A l'époque de l'hérésie de Nestorius, beaucoup de savants, obligés de quitter Constantinople, étaient venus s'offrir eux-mêmes et hâter les progrès que commençaient à faire les Arabes. Enfin, ceux-ci, en établissant des relations avec les Indiens et les Chinois, trouvèrent l'occasion de s'approprier plusieurs des plus importantes découvertes de ces deux peuples si anciennement civilisés. Ainsi, aux premiers ils empruntèrent les chiffres, le précieux système de numération et de calcul dont nous nous servons toujours si avantageusement, bien d'autres progrès dans les branches les plus importantes des Mathématiques et peut-être même certains instruments d'observation. Aux Chinois, ils durent la connaissance de l'invention du papier [2], celle de la boussole et aussi celle de la poudre; leur propre esprit d'entreprise faisait faire d'importants progrès à la navigation; des Ouvrages sur l'Arithmétique, l'Algèbre, la Trigonométrie, la Gnomonique, l'Astronomie et, en particulier, sur les instruments d'observation étaient composés et nous sont parvenus pour la plupart [3].

---

(1) On sait actuellement très bien à quoi s'en tenir sur la prétendue barbarie des conquérants de l'Égypte et sur le dilemme d'Omar, à propos de la Bibliothèque d'Alexandrie, dont l'incendie fut un accident regrettable, mais moins considérable qu'un autre qui avait eu lieu du temps de Jules César et dont on a fait beaucoup moins de bruit.

(2) On trouve des livres arabes écrits sur papier, d'une date bien antérieure à celle où cette invention se répandit en Europe et qui ne remonte pas au delà du XIVe siècle. Klaproth, après avoir rappelé que le papier est une découverte chinoise, dit que l'art de le fabriquer avait été introduit, en effet, par les Chinois à Samarcande d'où les Arabes le transportèrent en Europe (KLAPROTH, *Tableau historique de l'Asie,* p. 36).

(3) J.-J. SÉDILLOT et L.-AM. SÉDILLOT, *Traité des instruments astronomiques des Arabes* et *Mémoires sur les instruments astronomiques des Arabes* (Paris, Imprimerie royale; 1834 et 1841).

De Bagdad, le culte de l'Astronomie était revenu pour un temps en Égypte où, au xe siècle, Ebn-Jounis introduisait l'usage des tangentes et des sécantes six cents ans, selon la remarque de J.-J. Sédillot, avant Régiomontanus qui crut l'avoir imaginé le premier. Les prédécesseurs d'Ebn-Jounis avaient déjà substitué les sinus aux cordes dont les Grecs se servaient exclusivement.

Au xiie siècle, nous aurons à signaler particulièrement la *Géographie* d'Edrisi, mais c'est seulement au commencement du xiiie siècle que fut composé l'Ouvrage de beaucoup le plus important que nous connaissions, celui d'Aboul Hhassan-Ali, de Maroc, qui est à la fois un Traité de Gnomonique et d'Astronomie, accompagné de la description détaillée et de l'usage des instruments des observateurs arabes.

Le mouvement scientifique s'était propagé dans tout le bassin de la Méditerranée et avait acquis son plus grand développement en Espagne, d'où il s'étendit peu à peu chez les peuples chrétiens de l'Europe occidentale. Cette influence salutaire de la civilisation arabe sur celle de notre pays et des pays voisins a été éloquemment établie par plusieurs historiens modernes et nous n'avons pas à la démontrer à notre tour. Rappelons toutefois, en ce qui nous concerne, que, dès les premières années du ixe siècle, Charlemagne avait cherché à entrer en relation avec le célèbre khalife de Bagdad, Haroun-al-Raschid, dans le but d'inspirer le goût des Sciences à ses Francs, bien peu disposés à répondre aux soins et aux efforts de ce grand homme, ce qui suffirait pour témoigner de la très réelle supériorité intellectuelle de la race arabe à cette époque.

Près de deux siècles plus tard, le bénédictin Gerbert, d'Aurillac, qui devait par la suite devenir pape sous le nom de Silvestre II, était allé à Cordoue pour s'instruire et avait commencé, après son retour, à introduire chez nous quelques connaissances mathématiques.

Ce fut cependant seulement au xiie siècle que les chiffres indiens, qualifiés du nom de *chiffres arabes*, furent adoptés, et il faut arriver au xiiie siècle pour trouver à Paris un enseignement vraiment scientifique de l'Astronomie, entière-

ment emprunté d'ailleurs aux Arabes et donné par l'Anglais Holywood, beaucoup plus connu sous le nom de Sacro-Bosco ([1]).

Nous ne devons pas omettre de signaler, au XII<sup>e</sup> siècle, un événement des plus honorables pour la mémoire d'un prince chrétien, de cette race normande qui eut, à un si haut degré, l'esprit d'entreprise. C'est, en effet, pour satisfaire à la curiosité intelligente de Roger, roi de Sicile, que le savant arabe Edrisi composa sa *Géographie*, accompagnée de cartes nombreuses dont les spécimens que nous connaissons donnent une idée assez nette des conventions adoptées par les artistes qui ont exécuté l'œuvre mentionnée dans la Note ci-dessous, pour représenter les routes, les lieux habités et les montagnes ([2]).

---

([1]) Les Leçons de Sacro-Bosco ont été réunies en un livre qui, à partir de la découverte de l'Imprimerie, a eu soixante-cinq éditions plus ou moins étendues et souvent avec commentaires.

([2]) « Roger, roi de Sicile, d'Italie, de Lombardie et de Calabre, prince romain, dit Edrisi, voulut savoir, d'une manière positive, les longitudes, les latitudes des lieux et les distances des points sur lesquels les voyageurs instruits qu'il fit appeler en sa présence et qu'il interrogea par le moyen d'interprètes, soit ensemble, soit séparément, étaient tombés d'accord. A cet effet, il fit préparer une planche à dessiner; il y fit tracer un à un, au moyen de compas en fer, les points indiqués dans les Ouvrages qu'il avait consultés et ceux sur lesquels on s'était fixé d'après les assertions diverses de leurs auteurs et dont la confrontation générale avait prouvé la parfaite exactitude. Enfin, il ordonna qu'on coulât, en argent pur et sans alliage, un planisphère (table ronde) d'une grandeur énorme, de quatre cent cinquante livres romaines, chaque livre pesant cent douze drachmes. Il y fit graver, par des ouvriers habiles, la configuration des sept climats, avec celle des régions, des pays, des rivages voisins ou éloignés de la mer, des bras de mer et des cours d'eau; l'indication des pays déserts et des pays cultivés, de leurs distances respectives par les routes fréquentées, soit en milles déterminés, soit en (autres) mesures connues, et la désignation des ports, en prescrivant à ses ouvriers de se conformer scrupuleusement au modèle tracé sur la planche à dessiner, sans s'écarter en aucune manière des configurations qui s'y trouvaient indiquées.

» Il fit composer, pour l'intelligence de ce planisphère, un livre contenant la description des villes et des territoires, etc...

» J'ai donné à cet Ouvrage le titre de : *Délassements de l'homme désireux de connaître à fond les diverses contrées du Monde.*

» Terminé dans les derniers jours du mois de chesval, l'an 548 de l'Hégire (mi-janvier de l'an 1154 de J.-C.). »

Traduit de l'arabe en français par P.-Amédée JAUBERT (*Recueil des Voyages et Mémoires, publié par la Société de Géographie*, t. V). Imprimerie royale; MDCCCXXXVI.

La Note dont il s'agit peut se passer de commentaire, car elle résume très clairement les moyens dont on pouvait faire usage, à cette époque, pour construire une carte géographique ou topographique. On peut seulement se demander à quelles méthodes et à quels instruments on avait eu recours pour déterminer les latitudes et les longitudes ; on trouverait, au besoin, la réponse à cette question dans l'Ouvrage d'Aboul Hhassan, sur lequel nous allons nous arrêter et qui date précisément du commencement du XIII$^e$ siècle, par conséquent de plusieurs années avant la confection du planisphère de Roger et la composition de la *Géographie* d'Edrisi, auxquelles il dut beaucoup servir.

Pour déterminer la latitude, c'est-à-dire pour mesurer la hauteur du pôle, on employait l'*astrolabe* et pour obtenir la longitude, en suivant la méthode de Hipparque, on observait les éclipses de Lune avec des clepsydres ou des horloges mécaniques, et l'on comparait les heures entre les différentes stations où le phénomène avait été observé ([1]).

On sait, d'ailleurs, que c'est à une époque bien antérieure à celle d'Aboul Hhassan que remonte l'usage des instruments et des méthodes décrits dans son Ouvrage, qui a surtout le mérite d'en contenir un exposé très complet et quelquefois même un peu diffus.

Dès que les Arabes, en effet, eurent traduit et étudié la *grande composition mathématique* de Ptolémée, plus souvent désignée, d'après eux, sous le nom d'*Almageste*, ils voulurent continuer les travaux des Grecs et firent construire des instruments analogues à ceux qui étaient décrits dans cet Ouvrage, en leur donnant souvent de très grandes dimensions, ainsi des quadrants de quinze coudées et des sextants pour

---

([1]) Aboul Hhassan avait lui-même beaucoup voyagé en Espagne et dans le nord de l'Afrique ; il avait observé la hauteur du pôle de quarante et une villes, depuis la côte occidentale jusqu'en Égypte, c'est-à-dire sur un espace de neuf cents lieues de l'Est à l'Ouest. Il avait réuni aussi les renseignements géographiques recueillis par les savants de la plupart des contrées placées sous la domination des Arabes, et il était fort en état de faire la plus grande partie du travail de critique entrepris un peu plus tard par Roger et par son très intelligent collaborateur Edrisi.

observer la déclinaison du Soleil, divisés en degrés, minutes et même de six en six secondes.

Ils ne s'étaient donc pas bornés à copier servilement Ptolémée, et, de son *quart de cercle,* par exemple, dont l'usage semble avoir été très limité, ils avaient fait un *mural,* précurseur de l'*instrument des passages,* bien longtemps avant Tycho-Brahé qui croyait l'avoir imaginé [1].

Dans l'Ouvrage d'Aboul Hhassan, après la Cosmographie et la Chronologie, la Gnomonique occupe une place importante; on y trouve, notamment sur la théorie et la construction des cadrans solaires chez les Grecs, de très intéressants détails, bien plus complets que ceux que donne Vitruve et, en outre, la preuve de l'ingéniosité des astronomes arabes eux-mêmes, qui ont imaginé plusieurs appareils portatifs que l'on peut qualifier de *montres solaires,* employées concurremment avec les horloges mécaniques qu'elles servaient souvent à régler.

Enfin, et c'est surtout ce qui nous importe, Aboul Hhassan a terminé ce que l'on pourrait aussi appeler sa *grande composition,* par une description détaillée des instruments astronomiques proprement dits, quarts de cercle et sextants, sphères, hémisphères creux, armilles, planisphères, astrolabes variés, au nombre de dix au moins et d'autres encore, dont plusieurs se sont perpétués sous différents noms, mais dont les plus connus et les plus répandus, à partir de la Renaissance, sont les astrolabes, les seuls d'ailleurs sur lesquels il soit utile de donner quelques détails.

Nous ne saurions mieux faire, pour préciser la destination principale de ces instruments chez les Arabes, que d'emprunter les lignes suivantes au savant Mémoire de L.-Am. Sédillot :

« On a donné le nom d'*astrolabe* à plusieurs espèces d'instruments très différents; nous avons décrit plus haut l'instru-

---

[1] *Voir* L.-AM. SÉDILLOT, *Mémoire sur les instruments astronomiques des Arabes,* p. 18, et dans la *Tychonis Brahe astronomicæ instauratæ mechanica;* Norinbergæ, MDCII, la description et l'usage du « *Quadrans muralis* sive *Tychonicus* ».

ment de Ptolémée, qui se rapproche beaucoup des armilles. L'astrolabe des Arabes, au contraire, n'est à proprement parler que le planisphère de l'astronome d'Alexandrie, sur lequel on plaçait une règle avec deux pinnules pour mesurer la hauteur d'un astre. Cet astrolabe-planisphère est donc une projection des cercles de la sphère sur un plan qui permet de trouver les ascensions droites, les déclinaisons, les amplitudes, les hauteurs, les levers et les couchers des étoiles, etc. Les Arabes sont arrivés à un très haut degré de perfection dans la construction de cet instrument, et l'on sait que plusieurs de leurs astronomes ont reçu, comme titre honorifique, le surnom d'*Asterlabi.* »

On peut, d'un autre côté, d'après l'Ouvrage d'Aboul Hhassan, se faire une idée très suffisante de la construction et des usages les plus habituels de l'astrolabe. Le type des instruments de ce nom, qui ne différaient guère au surplus les uns des autres que par le choix du plan sur lequel on traçait le planisphère, consistait dans une plaque circulaire de métal d'une certaine épaisseur, avec une *face* et un *dos*. Le bord de la face ou le limbe était divisé en 360 degrés et souvent aussi en 24 heures; cette face présentait ensuite, sur sa plus grande étendue, une cavité appelée *mère de l'astrolabe* qui constituait une sorte de boîte ou de magasin destiné à recevoir une pile de planches minces ou feuillets également métalliques, sur les deux faces desquels étaient tracés des planisphères pour différentes latitudes et que l'on pouvait substituer les uns aux autres, en amenant en dessus celui dont on devait se servir. Sur ces feuillets (en arabe *shafiahs*) se trouvaient l'horizon, les almicantarats et les azimuts [1], les deux tropiques, le cercle équinoxial et, au-dessous de l'horizon, les arcs des *heures inégales* et la ligne du crépuscule et de l'aurore.

Au-dessus de ce planisphère était disposé un autre disque

---

[1] Nous ne devons pas manquer de rappeler, à ce propos, que ces deux mots et bien d'autres encore restés en usage, *alidade, zénith, nadir,* etc. ainsi que les noms d'un grand nombre d'étoiles sont arabes.

découpé et mobile appelé l'*araignée*, contenant les douze signes du zodiaque et un certain nombre d'étoiles remarquables avec leur position marquée par une dent ou un crochet plus ou moins orné, disposition qui donnait à l'instrument un aspect tout à fait pittoresque.

Sur le dos de l'astrolabe (*fig.* 6) étaient tracées plusieurs circonférences concentriques pour les degrés de hauteur, répartis en quatre cadrans de 90° chacun, les degrés du zodiaque, les noms des signes, les jours de l'année pour chaque mois, les noms des douze mois. Il restait encore à l'intérieur assez de place pour que l'on pût y graver les arcs des *heures inégales*, le *carré des ombres*, etc. Enfin, l'instrument était complété par une alidade et un anneau de suspension.

On a retrouvé un assez grand nombre d'astrolabes arabes, répondant à cette description, dont quelques-uns ont des écritures en caractères coufiques, par conséquent antérieurs au IVe siècle de l'Hégire, et d'autres plus modernes et même provenant des pays chrétiens, mais généralement copiés sur les instruments arabes. Nous donnons le dessin (*fig.* 7) de la face de l'un de ceux que possède le Conservatoire des Arts et Métiers et qui, malgré sa décoration et les inscriptions qui semblent appartenir au XVIe siècle, reproduit presque rigoureusement le type qui vient d'être décrit [1].

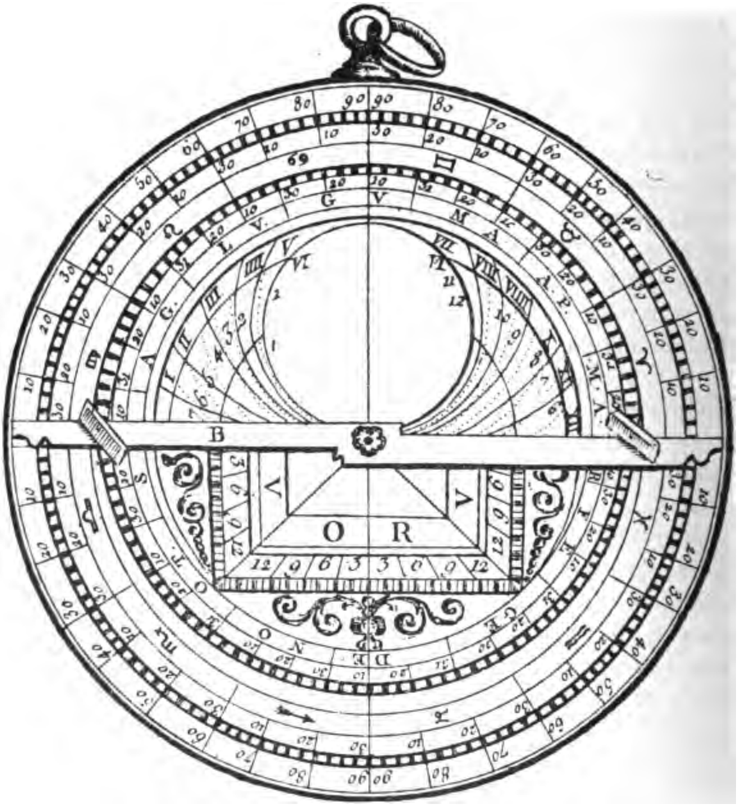
Quant aux observations et aux mesures que servait à faire l'astrolabe, elles n'étaient pas seulement destinées à des recherches astronomiques, mais aussi et surtout à d'assez nombreux usages civils et religieux. Après avoir déterminé la méridienne (*zaoual*) et les quatre points cardinaux, à l'aide du cercle de Proclus ou du cercle indien, et la latitude par une observation méridienne de la hauteur du Soleil ou d'une étoile remarquable, connaissant la déclinaison de l'astre (et

---

[1] La Bibliothèque Nationale possède quatre astrolabes d'origine arabe ou persane et trois autres, dont deux datés de Nuremberg, en 1526, et un de Rome, de 1622. La collection Spitzer en comprenait dix-huit, d'origine arabe, allemande, italienne et française, dont le diamètre variait de 0m,10 à 0m,50. Le Conservatoire des Arts et Métiers en possède deux de construction hollandaise dont il sera question plus loin. Il en existe beaucoup d'autres dans les collections publiques ou particulières, en France et à l'étranger.

l'ascension droite pour l'étoile), les astronomes arabes construisaient au besoin (s'il n'existait pas déjà dans leur collection) le planisphère sur l'horizon du lieu, et ensuite ils observaient souvent les hauteurs extra-méridiennes de l'un de ces astres pour trouver de jour et de nuit les *heures égales* ou les *heures temporaires;* ils déterminaient, en particulier, le commencement et la fin de l'*ashre* à la Mecque, c'est-à-dire de la

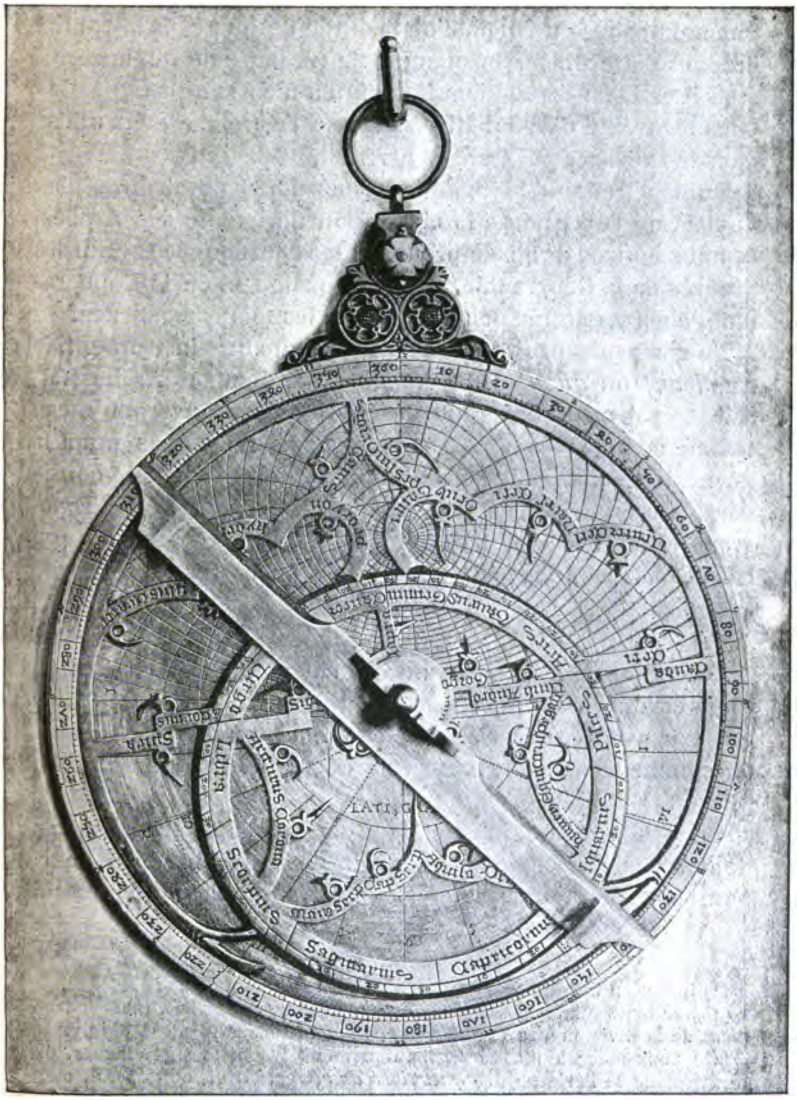
Fig. 6.



Dos d'un astrolabe du XVIe siècle.

sieste, réglée par les prescriptions du Coran. Ils se servaient encore de l'astrolabe disposé horizontalement pour trouver

Fig. 7.



Face d'un astrolabe des collections du Conservatoire des Arts et Métiers.

l'azimut de la *khéblah* ou *kéblah* (¹), pour déterminer l'amplitude ortive et l'amplitude occase de tel ou tel astre et notamment celles du Soleil, d'où la durée du jour et de la courbe crépusculaire du matin ou du soir (crépuscule ou aurore). Mais il est bien certain aussi, quoiqu'il n'en soit pas question dans l'Ouvrage d'Aboul Hhassan, que l'astrolabe était utilisé dans les voyages par terre et par mer.

Quoi qu'il en soit, la vogue de cet instrument devait durer bien au-delà de l'époque de la civilisation florissante des Arabes, et nous en trouverons la preuve et les conséquences pour les progrès de la Géographie, de la Navigation et de la Topographie, chez les autres peuples et dans les temps modernes.

Nous n'avons pas voulu insister sur un autre instrument, le *quadrant* ou *quart de cercle portatif*, dont les Arabes faisaient également un grand usage. Nous le trouverons mentionné comme ayant été utilisé depuis longtemps pour la navigation dans les mers de l'Inde, et l'on sait le rôle considérable qu'il a joué en Astronomie, en Géodésie et en Topographie; mais sa construction très simple ne comportait pas les détails dans lesquels nous avons dû entrer à propos de l'astrolabe (²).

Ce sont aussi les Arabes qui ont fait connaître aux navigateurs européens la précieuse propriété de l'aiguille aimantée qui leur avait été révélée par les Chinois, vraisemblablement au commencement du XIIᵉ siècle ou peut-être même un peu plus tôt.

On a si souvent, même dans des publications récentes, donné des renseignements erronés sur les origines de la boussole, que nous nous décidons à reproduire ici ceux qui

---

(¹) Direction des oratoires musulmans, vers le Temple de la Mecque.

(²) Sur leurs quarts de cercle, comme sur leurs astrolabes, indépendamment de la division des arcs en degrés, les Arabes traçaient différentes lignes pour aider à résoudre graphiquement les mêmes problèmes. On trouve donc là l'origine des *quartiers de réduction* et, en général, celle des diagrammes, si nombreux aujourd'hui, destinés à abréger les calculs numériques. Cette simple remarque nous paraît avoir son importance dans l'ensemble des idées heureuses que nous devons aux Arabes.

résultent des recherches concordantes de deux éminents philologues, Amédée Jaubert et Klaproth, qui ont, le dernier surtout, complètement élucidé la question.

Dans un Ouvrage où la plus haute érudition s'allie à la plus saine critique, modestement intitulé : *Lettre à M. le baron A. de Humboldt sur l'invention de la Boussole* (1), Klaproth énumère d'abord les noms donnés à l'aimant et à l'aiguille aimantée dans presque tous les idiomes d'Asie et d'Europe, et fait justice des prétentions affichées par plusieurs peuples occidentaux de les avoir créés et imposés aux autres (2).

Son attention se porte ensuite sur la question de savoir à quelle époque remonte la connaissance de la polarité de l'aimant, d'où est venu l'usage de l'aiguille aimantée dans la navigation, dans les voyages sur les continents, plus tard dans les relevés des itinéraires et enfin dans les reconnaissances topo-

---

(1) J. KLAPROTH, *Lettre sur l'invention de la Boussole;* Paris, Librairie orientale de Prosper Dondey-Dupré; 1834.

(2) En France, nous n'avons pas échappé à ce léger ridicule, en supposant d'abord que les mots *calamite,* petite grenouille verte, et *marinière* ou *marinette* donnés primitivement à la boussole étaient d'origine française, enfin en admettant que la fleur de lys, généralement adoptée par les peuples européens pour indiquer le Nord sur la rose des vents, était un indice évident de la priorité historique de l'emploi de la boussole par les marins français. Or le mot calamite est grec et anciennement employé, et ceux de marinière ou de marinette, dus à des erreurs de transcription, doivent être remplacés, d'après Paulin Paris, par *amaniere,* pierre d'aimant, ou *manete,* encore dérivé du grec μαγνήτης. Quant à la fleur de lys, il y a, en effet, bien des chances pour qu'elle date des croisades et du temps de Saint Louis, c'est-à-dire peu après que les *Francs* eurent emprunté l'usage de l'aiguille aimantée aux Arabes. Mais les Allemands ont prétendu à leur tour à cette priorité en se fondant sur ce que les noms de la rose des vents sont d'origine germanique.

Le nom de boussole lui-même a servi de prétexte à des revendications de la part des Anglais, des Italiens et des Grecs modernes. Ainsi les Anglais le faisaient venir de *boxel,* boîte, les Italiens de *bossolo,* dérivé de *bosso,* buis, et qui signifie aussi boîte, enfin les Grecs modernes de *mpousoula,* toujours boîte; Klaproth démontre le peu de vraisemblance de toutes ces étymologies et inclinerait plutôt pour celle de *mouassala* ou *moùssala,* le dard, sous lequel les Arabes désignaient la boussole très vraisemblablement avant que les peuples en question la connussent. Libri, qui tient pour l'étymologie italienne, objecte que la forme aiguë ou en dard n'existait pas au temps des Arabes. Tant il est vrai que les questions d'amour-propre tiennent une grande place dans l'histoire des Arts comme dans l'histoire politique.

graphiques. Il établit, contrairement à l'opinion du savant physicien Hanstæn ([1]), qu'en Europe, aucun document sur ce sujet n'est antérieur à la fin du XIIe siècle. Il rappelle alors les vers bien connus de Guyot de Provins, extraits d'une pièce satirique intitulée *la Bible*, qui date environ de 1190 et dont nous ne citerons que les suivants, les plus significatifs :

Quand la mers est obscure et brune,
Qu'on ne voit estoile né lune,
*Dont font à l'aiguille alumer* ([2]);
Puis n'ont-ils garde d'esgarer.
Contre l'estoile va la pointe,
Par ce, sont li marinier cointe
De la droite voie tenir,
C'est un ars qui ne peut fallir.

Beaucoup d'autres auteurs, français pour la plupart, un anglais et un italien, postérieurs à Guyot de Provins, Jacques de Vitry, Gauthier d'Espinois, Brunetto Latini, Albert-le-Grand, Vincent de Beauvais, ont parlé de l'aiguille aimantée, et les deux derniers avaient cru trouver dans une traduction arabe d'un prétendu Traité d'Aristote sur les pierres, que la polarité de l'aimant était connue des Grecs, mais cela n'est aucunement fondé et prouve simplement, selon Klaproth, « que ce qu'on savait à cette époque sur ce sujet provenait de livres arabes ».

Citons encore ce passage tout à fait explicite tenu pour incontestable par notre auteur sur le sens critique duquel on peut assurément compter :

« Sous le règne de Saint Louis (ainsi entre 1226 et 1270), dit le savant jésuite Riccioli, les navigateurs français se servaient déjà ordinairement de l'*aiguille aimantée, qu'ils tenaient nageant dans un petit vase d'eau et qui était soutenue par deux tubes pour ne pas aller au fond.* »

---

([1]) Hanstæn avait cru, d'après un passage d'un ancien Ouvrage norvégien, sûrement intercalé postérieurement, que l'aiguille aimantée était connue en Islande dès le XIe siècle.

([2]) Alors les mariniers placent une lumière près de l'aiguille. (PAULIN PARIS).

Il y a, dans ces quelques lignes, deux faits d'un grand intérêt, le premier qui confirme la date de l'usage de l'aiguille aimantée fait couramment par nos marins, et le second qui précise la manière dont cette aiguille était soutenue sur l'eau, justifiant ainsi le nom de *calamite* qui lui avait été primitivement donné.

On ne sait pas très bien, au contraire, malgré tous les motifs que l'on a de croire à une date sensiblement antérieure, celle à laquelle les marins arabes ont commencé à se servir de la boussole aquatique. C'est seulement dans un manuscrit de la Bibliothèque Nationale, terminé en l'an 681 de l'Hégire (1282 ans de J.-C.), que l'auteur Bailak mentionne l'usage de l'aimant dans la navigation vers 1242, en donnant une description précise de l'instrument.

« Les capitaines qui naviguent dans la mer de Syrie, dit-il, lorsque la nuit est tellement obscure qu'ils ne peuvent apercevoir aucune étoile pour se diriger selon la détermination des quatre points cardinaux, prennent un vase rempli d'eau qu'ils mettent à l'abri du vent, en le plaçant dans l'intérieur du navire; ensuite ils prennent une aiguille qu'ils enfoncent dans une cheville de bois ou dans un chalumeau, de telle sorte qu'elle forme comme une croix. Ils la jettent dans l'eau que contient le vase disposé à cet effet et elle y surnage.... J'ai vu cela de mes yeux durant notre voyage par mer, de Tripoli de Syrie à Alexandrie, en l'année 640 (1242 de J.-C.).

» On dit que les capitaines qui voyagent dans la mer de l'Inde remplacent l'aiguille et la cheville de bois par une sorte de poisson de fer mince, creux et disposé de telle façon que, lorsqu'on le jette dans l'eau, il surnage et désigne par sa tête et par sa queue les deux points du Nord et du Midi. »

Klaproth fait remarquer avec raison que ce que dit Bailak du poisson dont on se servait dans les mers de l'Inde, à l'époque où il voyageait sur les côtes de Syrie, démontre que cette pratique y était connue antérieurement, et il en conclut que la boussole était sûrement en usage au commencement du XII^e^ siècle, aussi bien chez les Arabes que chez les

Européens. Dans tous les cas, l'invention de la boussole ne saurait être attribué, comme on l'a fait pendant très longtemps, à Flavio Gioja, né dans un village voisin d'Amalfi ([1]), vers la fin du XIII[e] siècle, et Libri le reconnaît tout le premier en essayant cependant d'expliquer cette légende par un perfectionnement que pouvait avoir apporté son compatriote à la construction de la boussole, en lui donnant sa forme actuelle en 1302 ou 1303, mais sans en fournir la moindre preuve.

On sait, au surplus, à n'en pas douter, que les Chinois ont connu, dès la plus haute antiquité, les propriétés de l'aimant et, en particulier, sa polarité. Dès l'an 121 de J.-C., on trouve dans un dictionnaire cette définition caractéristique : *Aimant, nom d'une pierre avec laquelle on peut donner la direction à l'aiguille.* Dans un autre dictionnaire, composé au XI[e] siècle, il est dit que de 265 à 419 de J.-C., il y avait des navires qui se dirigeaient vers le Sud au moyen de l'aimant.

Toutefois, dans les textes consultés par Klaproth, la première description bien nette de la boussole ne se trouve qu'à une date comprise entre 1111 et 1117 de J.-C.

Sans entrer dans tous les détails de l'histoire de la boussole chinoise et en laissant de côté les *chars magnétiques* imaginés peut-être les premiers pour servir à guider dans les voyages par terre, nous ajouterons que les *boussoles à eau* ont continué pendant longtemps à être en usage en Chine, mais que *les boussoles sans eau,* dans lesquelles l'aiguille aimantée reposait sur un pivot comme dans les instruments actuels, sont aussi très anciennes. Leur mode de suspension était si ingénieux, que l'aiguille, très courte et très légère, il est vrai, restait de niveau dans toutes les parties du globe, c'est-à-dire que l'*inclinaison* ne s'y manifestait pas comme cela arrive avec nos aiguilles.

S'ils avaient su éviter les inconvénients de l'inclinaison qu'ils semblent avoir connus et prévus, les Chinois n'ignoraient pas

---

([1]) Cette opinion avait même été célébrée en vers :

*Prima dedit nautis usum magnetis Amalphis.*

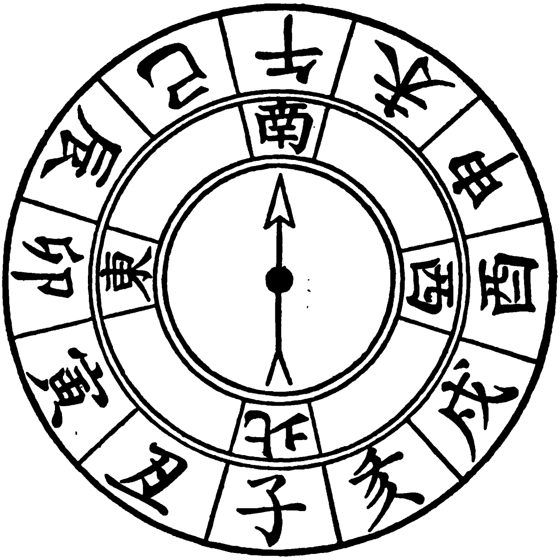
et encore :

*Inventrix præclara fuit magnetis Amalphis.*

non plus l'existence de la *déclinaison* dont la découverte a été attribuée à Christophe Colomb, lors de son premier voyage en 1492 [1]. Voici le passage dans lequel il est question de la déclinaison et qui est extrait d'une histoire naturelle médicale écrite de 1111 à 1117 : « Quand on frotte avec

Fig. 8.

SUD.




NORD.

Boussole japonaise.

l'aimant une pointe de fer, elle reçoit la propriété de montrer le Sud; cependant elle décline toujours vers l'Est et n'est

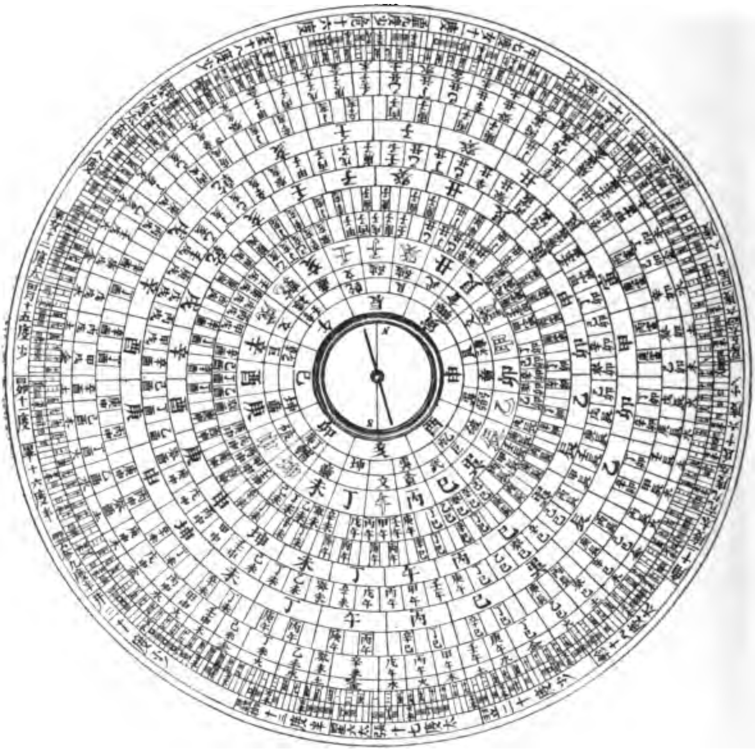
---

[1] Christophe Colomb avait découvert la variation de la déclinaison, et la citation que nous faisons semble ne viser que l'écart, quel qu'il soit, de la direction de l'aiguille par rapport au méridien. Nous laissons la responsabilité de l'interprétation des textes chinois au savant auteur de la lettre à Humboldt.

pas droite au Sud, mais dirigée vers le point *Ping*, c'est-à-dire Est $\frac{5}{6}$ Sud. »

La forme de la boussole a toujours été circulaire, mais les rumbs de vents y ont varié en nombre : huit, douze, seize,

Fig. 9.



Boussole chinoise.

vingt-quatre (que les Européens ont porté à trente-deux). Nous donnons ici la figure d'une boussole japonaise (*fig.* 8) dont le limbe est divisé en douze rumbs comme celui de beaucoup de boussoles chinoises.

Nous donnons également, toujours d'après Klaproth, la figure d'une boussole astrologique des Chinois (*fig.* 9), au

milieu de laquelle se trouve une très petite aiguille avec un limbe divisé en vingt-quatre rumbs de vents, mais accompagné d'un grand nombre de divisions concentriques dont les usages ne sont pas bien connus. On sait cependant qu'avant de construire une maison, l'instrument servait, entre les mains des sorciers, à déterminer si l'emplacement était bien choisi.

On trouve encore assez souvent de ces boussoles astrologiques dont un exemplaire existe dans les collections du Conservatoire des Arts et Métiers, et c'est ce qui nous a déterminé à en dire quelques mots.

Nous arrêterons là les renseignements, un peu longs sans doute, mais que nous avons cru nécessaire de donner pour bien marquer l'influence qu'ont eue les Arabes sur le développement d'un art qui a emprunté, à son grand avantage, comme nous le savons et comme nous le verrons mieux par la suite, le secours des deux précieux instruments dont il a été question dans ce paragraphe.

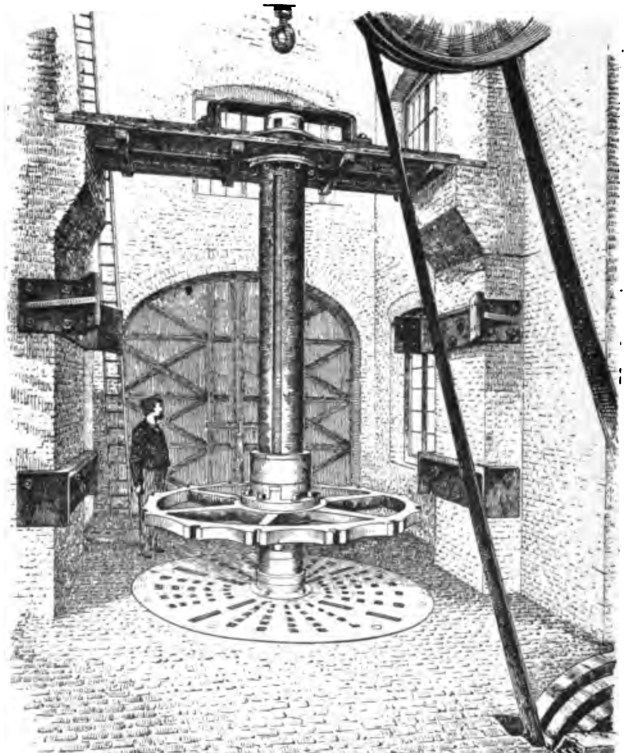
Nous n'avons pas rencontré de documents précis sur l'usage qu'en ont pu faire eux-mêmes les arpenteurs arabes ni d'indications suffisantes sur la manière dont ils pratiquaient le nivellement pour exécuter leurs admirables travaux d'irrigation ; on cite seulement, d'après le savant chimiste anglo-américain J.-W. Draper, qui fut aussi un érudit très distingué, un Traité d'Arpentage écrit par Al-Baghadadi, et qui était si parfait qu'on l'avait attribué à Euclide, ce qui prouve d'ailleurs qu'il ne pouvait y être, en aucune façon, question de la boussole.

(*A suivre*).

*Boulton, Murdoch, Maudsley*, etc., en général trop éclipsés par la gloire de l'illustre inventeur.

Pour vous donner une idée de ce que pouvait être, aux pre-

Fig. 2.



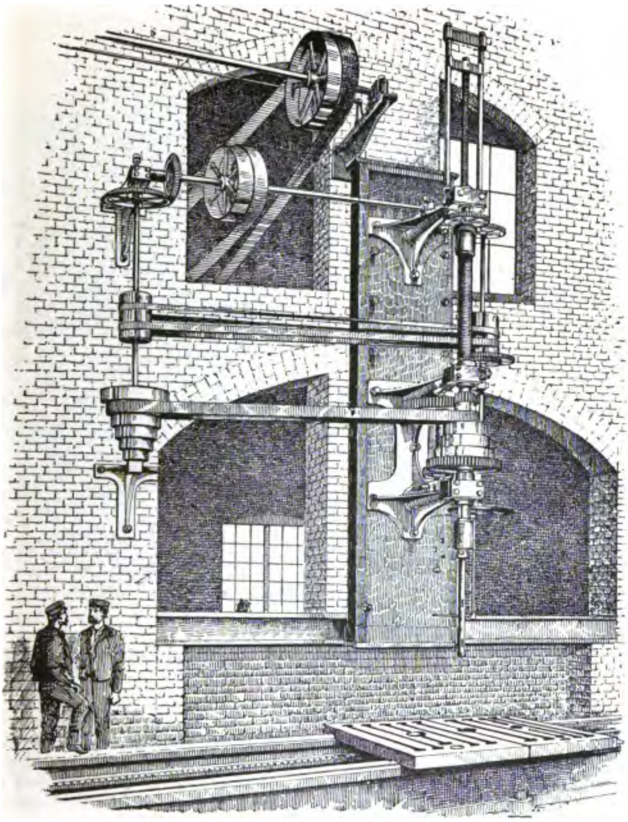
Alésoir vertical de la fonderie de *Soho*.

Diamètre de la barre 355mm, mécanisme analogue à celui de l'alésoir horizontal. Pour placer l'ouvrage, la barre est enlevée par une grue avec son porte-outils, puis replacée dans le manchon de son pignon hélicoïdal, disposé sous la table ou plateau d'ajustage que l'on voit percée des trous nécessaires pour y fixer les pièces à travailler.

miers jours de l'ère de la machinofacture actuelle, la fabrication de pièces considérées aujourd'hui comme des plus simples,

je vous citerai les deux exemples suivants : A la vieille fonderie de Soho, il existe encore des vis à filets carrés de $50^{mm}$ de diamètre, de $3^m$ de long et de quatre filets par pouce, taillées

Fig. 3.



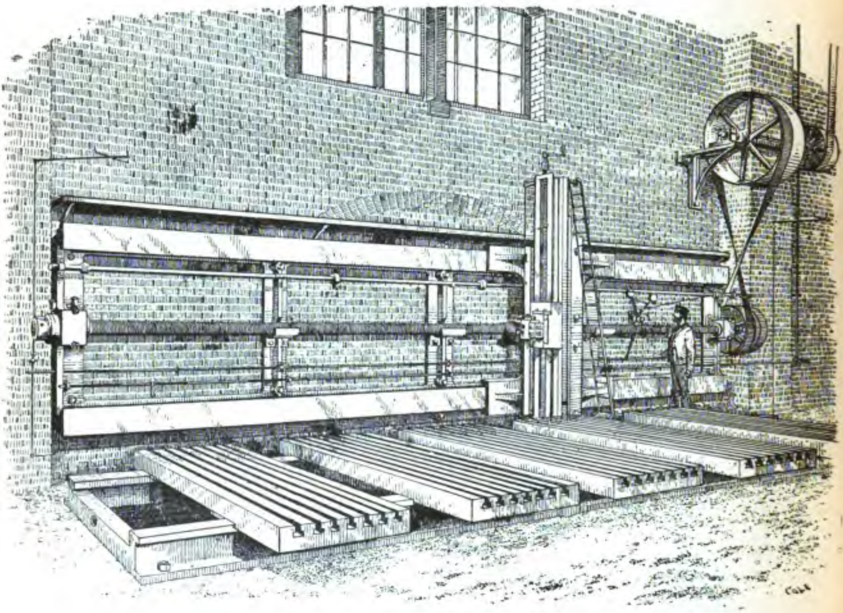
Perceuse-aléseuse verticale murale de la fonderie de *Soho*.

Hauteur totale $7^m,50$, longueur du banc $11^m$, avec deux tables supportant et fixant les extrémités des pièces à percer : distance du foret à la muraille, $1^m,05$. Cette machine avait été étudiée spécialement pour le perçage, le façage et l'alésage des balanciers de machines à vapeur.

entièrement au burin. Le cylindre de la célèbre machine installée en 1775, par *Smeaton*, à Chacewater, qui avait $2^m,70$

de course sur $1^{m},93$ de diamètre, belle pièce de fonderie même pour notre époque, n'a pas été alésé, mais gratté par des hommes placés dans l'intérieur avec des pierres de meules à la courbure du cylindre. Les machines-outils installées par Watt et ses premiers successeurs dans la fonderie de Soho vont

Fig. 4.



Raboteuse universelle murale des ateliers de *Soho*.

Longueur du châssis mural $8^{m}.10$, largeur $2^{m},73$, banc de $8^{m},10 \times 3^{m},05$, avec quatre tables de $115^{mm}$ d'épaisseur. Montant guidé sur le châssis mural par des patins de $230^{mm}$ de large, commandé par un demi-écrou de $0^{m},60$ de long et une vis de $100^{mm}$ de diamètre à deux filets, pas de $16^{mm}$, course longitudinale $6^{m},60$, course verticale de l'outil $2^{m},75$. Porte-outils réversible à quatre tranchants agissant à l'aller et au retour horizontalement. Deux de ces machines, disposées à la suite l'une de l'autre, permettaient de dresser des surfaces de $13^{m},50 \times 2^{m},75$.

bientôt disparaître : elles sont des plus intéressantes au point de vue historique, et parce que l'on y trouve, appliqués sous une forme différente, il est vrai, de celle de nos machines actuelles, presque tous les principes fondamentaux de ces ma-

chines; vous le reconnaîtrez facilement par les quelques dessins de ces machines que je fais maintenant passer sous vos yeux (*fig.* 1 à 4). Ces machines, bien que construites à l'aide de moyens tout à fait primitifs, ont été non seulement très ingénieusement conçues, mais aussi admirablement établies, comme de véritables œuvres d'art. Des tours, dont le plateau est conduit directement par une vis sans fin en prise avec une denture en bois, fonctionnent depuis plus de quatre-vingts ans et, encore aujourd'hui, avec une régularité parfaite. Cette denture, graissée au suif et à la plombagine, dure jusqu'à trente ans, et son élasticité, supprimant presque tous les jeux, assure à sa marche une incomparable douceur.

Les machines-outils doivent permettre d'exécuter les travaux de façonnage avec la plus grande précision, la plus grande économie possible.

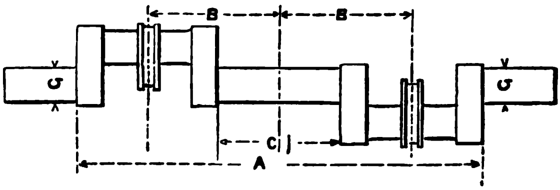
Comme précision, l'on arrive aujourd'hui, dans les travaux de fraisage et d'alésage, facilement au dixième de millimètre près, et parfois au cinquantième et au centième de millimètre [1]. Un cylindre de $50^{cm}$ à $60^{cm}$ de diamètre doit non seulement laisser passer dans toute sa longueur le piston-calibre qui sert à le vérifier, mais, le cylindre étant posé par une de ses brides sur une surface plane en fonte appelée *marbre*, ce calibre doit se maintenir suspendu, flottant sur l'air même qu'il renferme et comprime dans ce cylindre. Voici (*fig.* 5) un arbre coudé de forme assez compliquée, avec deux excentriques venus de forge; les tolérances admises, en plus et en moins, sont respectivement de $0^{mm},25$ pour la cote A,

---

[1] Cette précision, qui semble *a priori* extraordinaire, est souvent bien dépassée. La longueur des mètres étalons s'évalue au micron ($\frac{1}{1000}$ de millimètre); le sphéromètre de *Grub* permet d'apprécier le $\frac{1}{5000}$ de millimètre, la balance de torsion à fil de quartz de *Boys* permet d'apprécier une attraction de 1 vingt-milliardième de grain ou de 1 trois cent-milliardième de gramme; le pendule de *Darwin* donne l'angle de $\frac{1}{300}$ de seconde, celui, à peu près, sous-tendu par un sou à un kilomètre. L'analyse spectrale différentie des fractions d'onde à 1 milliardième de millimètre. Certains chefs-d'œuvre de travaux individuels exigent une minutie absolument extraordinaire : telle est, par exemple, la montre de 2 lignes ou de $6^{mm}$ de diamètre actuellement exposée à Genève.

$0^{mm},05$ pour les cotes B et C, et $0^{mm},025$ pour G. Et remarquez

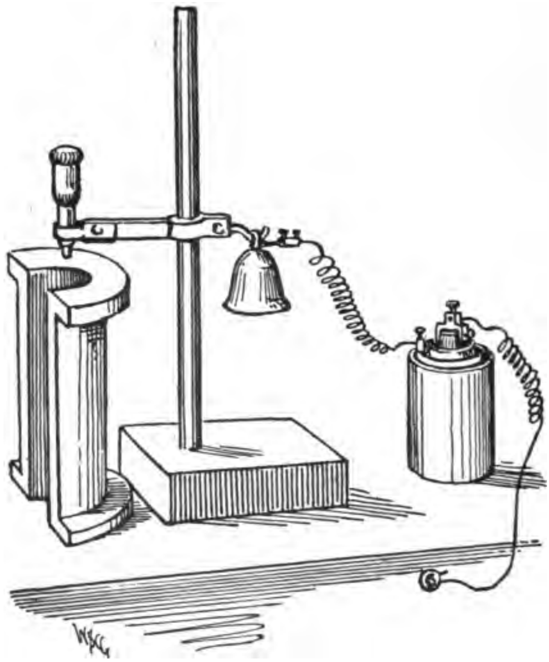
Fig. 5.




Tracé d'un arbre de machine à vapeur *Willans*.

que cette précision n'est pas aujourd'hui un luxe, elle est in-

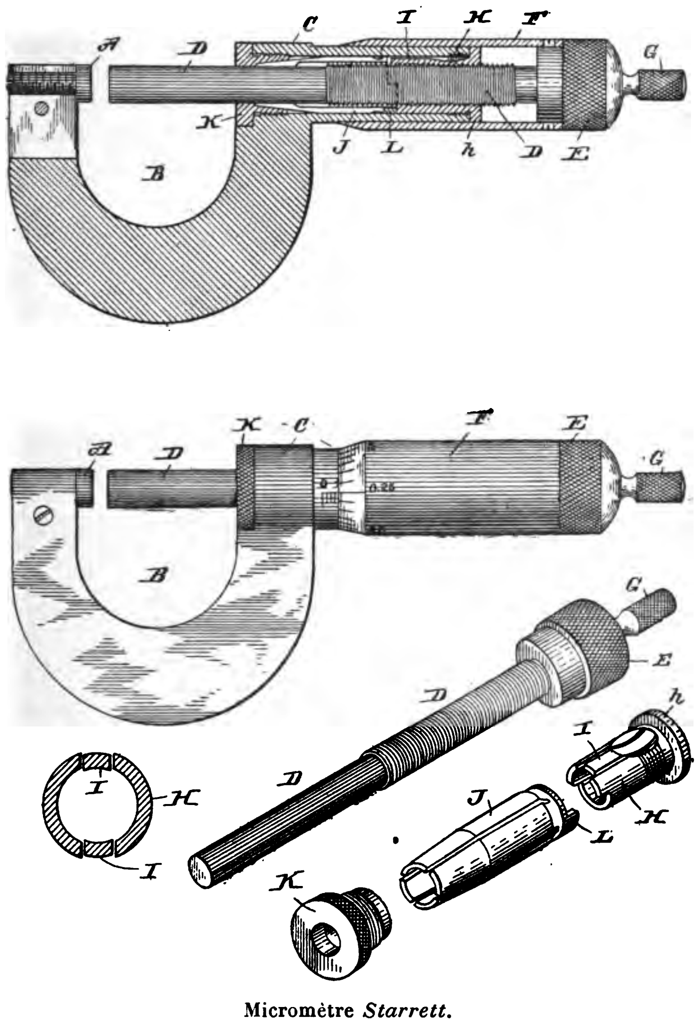
Fig. 6.



Jauge électrique permettant de vérifier par la sonnerie indiquée
la longueur des coussinets passés sur le marbre.

dispensable pour assurer l'interchangeabilité des pièces; en

Fig. 7.



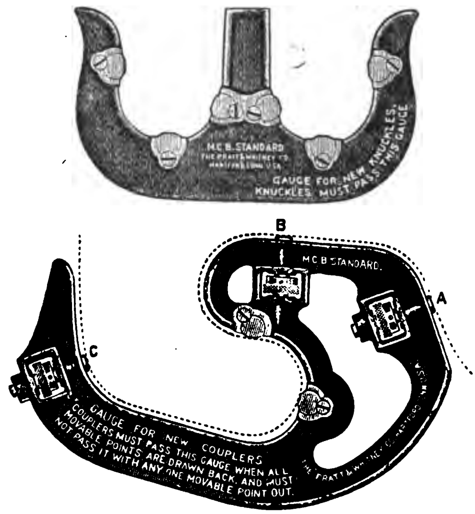
Micromètre *Starrett.*

A, touche fixe réglable, filetée et pincée dans B. — D, touche mobile, à deux vitesses E et G, filetée dans la douille fendue IH*h*, dont les languettes déprimées I, I serrent automatiquement les filets de D. — J, douille fendue, embrayée en L avec H, et serrant D par l'écrou K. La pression oblique des languettes I, I rattrape automatiquement le jeu de la vis D dans son écrou H; en outre, D peut être fixé par le serrage de K sur J de manière à conserver la mesure prise sans fatiguer la vis D.

outre, pourvu qu'on s'y prenne bien, elle ne coûte pas plus cher, elle coûte moins cher même que le mauvais travail, par les frais d'ajustage qu'elle économise immédiatement et par le bon renom qu'elle rapporte bien vite au constructeur qui se l'impose.

Il faut, pour réaliser facilement cette précision, disposer non seulement de machines-outils parfaitement établies, bien

Fig. 8.




Calibre multiple *Pratt-Whitney*.

**Mâle et femelle à touches réglables A, B, C, pour la vérification des crochets d'attelages automatiques de wagons.**

conduites et largement outillées, mais encore de tout un attirail de jauges (*fig.* 6 et 7), calibres (*fig.* 8), mesures, marbres, employés avec intelligence et scrupule par les ouvriers mêmes et par les vérificateurs entre les mains desquels toutes les pièces doivent passer pour être examinées et poinçonnées avant d'être distribuées aux ajusteurs ou cataloguées dans le magasin d'approvisionnement. Ce système de vérification, trop rarement pratiqué chez nous et des plus utiles dans tous les ateliers, est absolument indispensable dans les manufactures à

grande production multiple. Un seul exemple suffira : celui des fabriques de machines à coudre Singer, dont l'une, à Elisabeth (États-Unis), produit, avec 3500 ouvriers, 1500 machines à coudre par jour, et dont l'autre, celle de Kilbonie, en Écosse, en produit jusqu'à 1600 avec 4000 ouvriers. La fonderie de cette dernière usine peut, grâce à l'emploi des machines à mouler, couler par jour jusqu'à 125 tonnes de ces petites pièces de machines à coudre. Il y a, constamment disponibles dans l'outillage, plus de 4000 fraises, pour remplacer à mesure et immédiatement celles qui s'usent au travail.

Sans nous arrêter davantage à ces généralités, nous allons maintenant passer rapidement en revue les principaux types de machines-outils employés pour le travail à froid des métaux dans les ateliers de constructions.

Le TOUR est peut-être la plus ancienne des machines-outils proprement dites et c'est encore, de beaucoup, la plus utile et la plus répandue; il n'existe guère, en effet, de machine pour la construction de laquelle on ne soit obligé d'employer le tour, et cet appareil, d'une utilité aussi capitale, présente, en outre, l'avantage de se prêter à l'exécution de motifs de décoration excessivement variés. De là, ces tours à copier, à guillocher, etc., dont la monographie remplirait à elle seule tout un volume. Le principe du tour est néanmoins des plus simples, il consiste à faire décrire à la pointe de l'outil, par rapport à l'axe de la pièce en travail, une hélice ou une spirale. Dans le premier cas, l'on obtient un solide de révolution cylindrique lisse ou fileté suivant que les spires de l'hélice sont assez rapprochées pour se recouvrir mutuellement ou écartées les unes des autres du pas même de la vis ; dans le second cas, l'on obtient des surfaces ou des sections planes, comme dans le dressage des brides, plateaux, etc.

Ce principe si simple du tour s'est montré, entre les mains des innombrables inventeurs qui s'en sont occupés, d'une fécondité véritablement merveilleuse. Dans le second cas, par exemple, où l'outil se déplace perpendiculairement à l'axe de la pièce, imprimez à cet outil non pas un mouvement radial

continu, mais un mouvement alternatif varié suivant une loi quelconque, radial ou excentré, et vous obtiendrez des réseaux de guillochage d'une richesse et d'une variété infinies, et l'application de ces mêmes mécanismes vous permettra de tourner les profils les plus compliqués, notamment les sections elliptiques. Ce même principe : de l'outil conduit par une forme à reproduire, ou *gabarit*, permet de tourner les pièces suivant les profils longitudinaux les plus complexes. Enfin, l'application des pantographes à ce guidage de l'outil permet de reproduire, par amplification ou réduction, les reliefs les plus délicats des médailles ([1]).

En construction mécanique, l'on n'emploie guère que deux solides de révolution : le cylindre et le cône, qui se réalisent au tour d'une façon particulièrement simple et précise, par des mécanismes permettant de régler avec facilité et sûreté la course, la pénétration, l'inclinaison et la vitesse de l'outil. Je ne puis malheureusement insister sur ces mécanismes, quies rattachent à la monographie du chariot de tour, et particulièrement à celle des chariots composés ou *compound*, non plus que sur les mécanismes de filetage, destinés à permettre d'établir à volonté des séries de rapports rigoureusement déterminés entre les vitesses de translation de l'outil et de rotation de la pièce, mais seulement que vous indiquer à la hâte quelques modifications de détail apportées à la construction habituelle des tours pour en améliorer le travail, et surtout quelques spécialisations du tour adaptées au travail rapide et précis des pièces en séries suffisamment nombreuses.

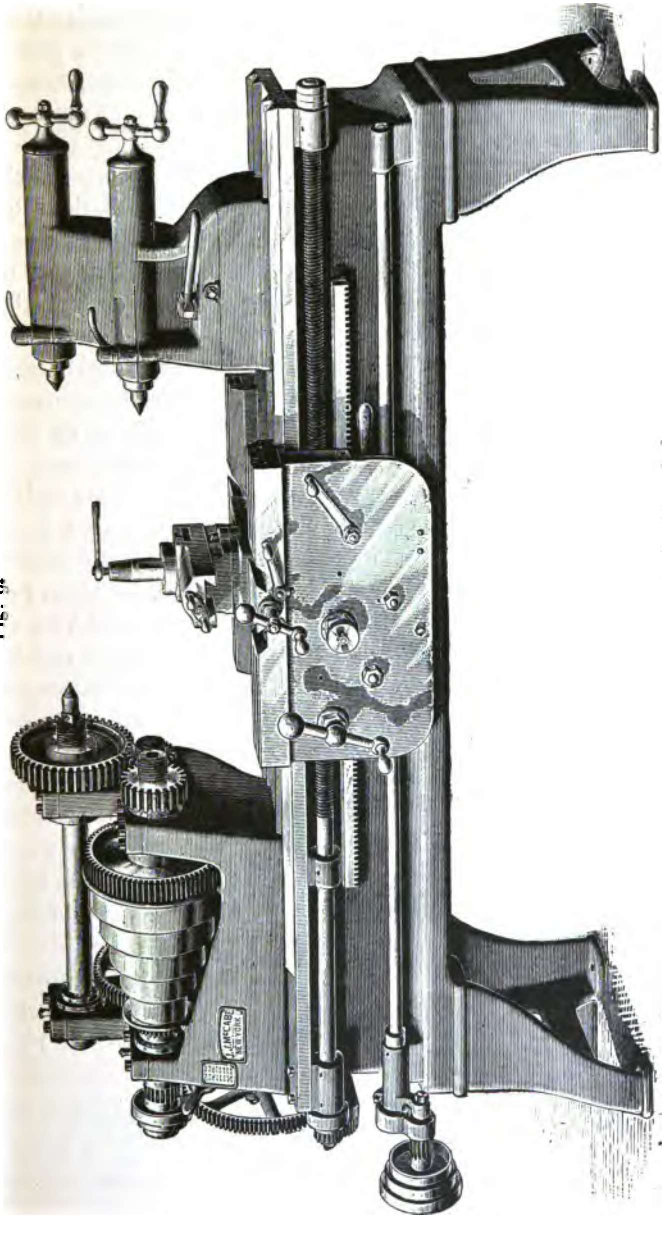
Voici, par exemple, le *tour à quatre pointes* (*fig.* 9) de *Mac Cabe*. Il permet de tourner, sans avoir à changer ou exhausser démesurément les poupées, des pièces de diamètres très différents, et peut, par conséquent, rendre de grands services dans un atelier de moyenne importance, ne possédant que peu de machines-outils.

Dans le *tour à fileter* de *Norton*, très employé aux États-Unis, et qui commence à se répandre en France, les mécanismes

---

([1]) Exemple le tour du capitaine *Chastenet* (*Bulletin de la Société d'Encouragement*, août 1895, p. 90).

Fig. 9.



Tour à double poupée de *Mac Cabe.*

Longueur du banc $3^{m}$, hauteur des pointes $600^{mm}$ et $960^{mm}$.

habituels de variation des pas sont remplacés par un jeu d'engrenages qui, par la manœuvre d'un simple bouton, permet d'exécuter très facilement et sans erreur possible les pas marqués sur les encoches dans lesquelles on enclenche successivement ce bouton ([1]).

On a très fréquemment à répéter un grand nombre de fois, sur une longue série de pièces, une suite d'opérations qui exigeraient, à chaque fois, avec un tour ordinaire, le changement de l'outil, d'où une perte de temps considérable et un manque de précision provenant de l'incertitude qu'entraîne toujours l'ajustage d'une nouvelle opération. Tous ces inconvénients sont évités par le *tour à revolver* (*fig.* 10), ainsi nommé parcequ'il a pour organe caractéristique une tourelle pivotante, de forme analogue à celle d'un barillet de revolver, et dans laquelle sont implantés les différents outils nécessaires pour effectuer les opérations successives en question. Ces opérations s'effectuent, dans certains de ces tours, d'une façon entièrement automatique, principalement dans l'intéressante variété connue sous le nom de *machines à vis*. Une barre de fer, avancée automatiquement de la longueur d'une vis, est successivement arasée, tournée, taraudée, décolletée par les outils du revolver, qui, chacun, s'engagent puis se dégagent automatiquement une fois l'opération finie; et, dans certaines de ces machines, la vis, ainsi fabriquée puis détachée de sa barre, est saisie par une pince qui la présente automatiquement à la petite scie destinée à opérer le fendage de la tête. La fabrication des vis horlogères par ces machines, avec une précision et une rapidité véritablement extraordinaires, constitue l'une des applications les plus remarquables de la Mécanique au façonnage automatique des métaux ([2]).

Les tours à revolver ne s'emploient pas seulement pour le travail des petites pièces; on en a, depuis quelques années, considérablement étendu l'application aux travaux les plus

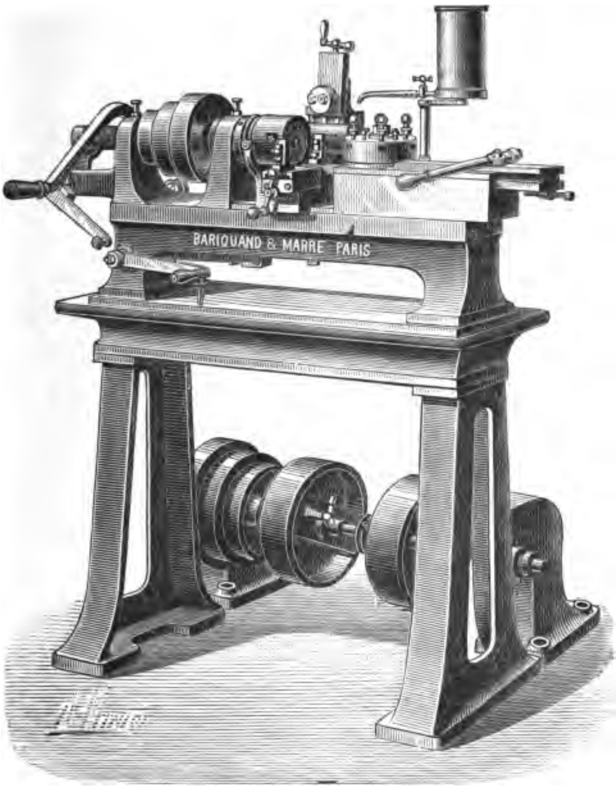
---

([1]) *Voir* mon *Traité des machines-outils*, t. I, p. 181. La plupart des figures illustrant la présente Conférence sont extraites de cet Ouvrage, et leurs clichés nous ont été obligeamment prêtés par son éditeur, M. Baudry.

([2]) *Voir* les machines de *Grotz, Claussen, Mac Dougald, Church* (G. RICHARD, *Traité des machines-outils*, t. II).

importants du tournage, de l'étirage et du taraudage. Vous

Fig. 10.




Tour revolver à neuf outils *Bariquand.*

Hauteur des pointes 125mm, longueur du banc 850mm. Ce tour est construit pour le décolletage rapide et précis des vis et pièces mécaniques, percées ou taraudées, de 20mm de diamètre au maximum. L'arbre est à collets *trempés et rectifiés,* avec bagues extensibles à rattrapage de jeu concentrique. La tourelle en acier peut recevoir six outils; elle est montée sur une coulisse dont le déplacement par un levier produit automatiquement au recul le mouvement du revolver. La coupe des outils est réglée au moyen d'une butée. Le chariot transversal, mû par vis, reçoit deux outils. La barre à fileter porte une coulisse verticale qui reçoit l'outil et un levier qui s'appuie sur la vis-mère fixée au bout de l'arbre. Une disposition spéciale permet d'exécuter des filetages coniques. Au moyen d'un levier disposé sur le devant du banc, on produit, sans arrêter le tour, le desserrage du mandrin, l'avance de la barre et son serrage. On obtient ainsi une économie de temps considérable. Le mandrin peut être remplacé par un plateau ou montage quelconque pour la reprise des pièces en l'air. Le renvoi de mouvement est à renversement en marche par poulies à friction.

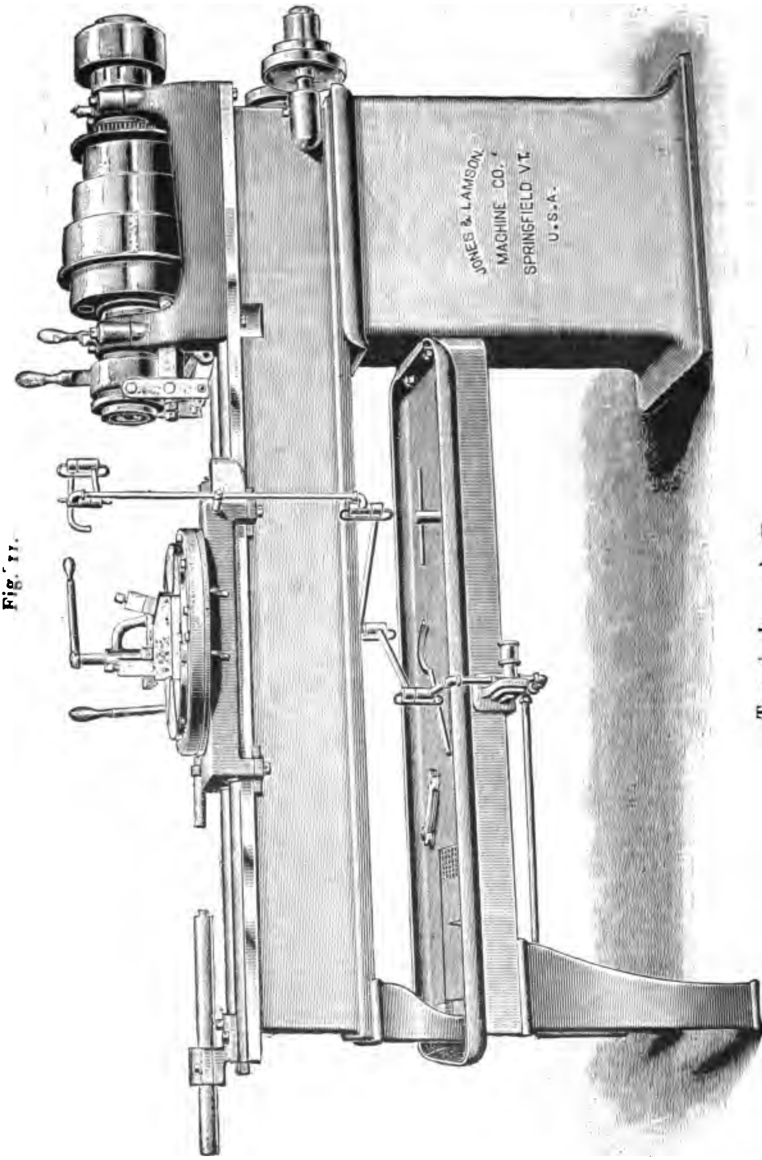



Fig. 11.

Tour à plaque de *Hartness*.

Le remplacement du revolver par une plaque plus stable permet d'y monter des outils plus nombreux et plus puissants, sans encombrer le banc ; la plaque tourne automatiquement à chaque passe, non pas toujours de l'angle compris entre deux porte-outils consécutifs, mais de celui compris entre ceux de ces outils actuellement en travail consécutif, ce qui accélère le travail. (Pour plus de détails sur ce tour, *voir* mon *Traité des machines-outils*, t. I, p. 108, et t. II, p. 475.)

avez sous les yeux un remarquable exemple de ces grands

tours à revolver, d'un emploi fréquent aux États-Unis ([1]).

Je citerai encore, dans ce même ordre d'idées, les *tours à plaques,* dérivés, comme vous le voyez (*fig.* 11), presque immédiatement des tours revolvers, dont on a remplacé le

Fig. 12.




Tour vertical de *Hulse.*

Ce tour peut traiter des poulies de 3m de diamètre sur 2m,70 de large. Le plateau, à 20 vitesses, peut tourner soit sur une glissière circulaire en U, soit sur pivot. Les porte-outils équilibrés sont automatiques dans toutes leurs inclinaisons, réglées par des vis sans fin. On peut ajouter à la traverse une barre d'alésage fonctionnant, par le moyen des poulies, en même temps que le tournage. Poids du tour : 50 tonnes.

barillet par une plaque très stable et se prêtant mieux à l'installation d'outils multiples et de formes les plus variées.

---

([1]) Tour de la *Gisholt Machine C°* et nouveau tour des *Niles Tool Works* (*Traité des machines-outils,* t. I, p. 91, et t. II, p. 464.)

On emploie depuis assez longtemps, aux États-Unis, un genre particulier de tours, qui commence à se répandre en Europe, et dans lequel, comme vous le voyez (*fig.* 12), le plateau sur lequel on monte les objets à tourner est non pas vertical, mais *horizontal*. Cette disposition permet de donner sans peine à ce plateau une stabilité presque absolue, et rend plus facile et moins dangereux le centrage et le montage des pièces lourdes, que leur poids aide à maintenir fixées sur ce plateau. Par contre, il est plus difficile de donner aux longs bras ajustables qui portent les outils toute la rigidité nécessaire pour les très gros travaux; c'est le point faible de cette ingénieuse machine, dont la supériorité sur les tours ordinaires est néanmoins, pour un grand nombre de travaux, tels que le tournage et l'alésage des roues et des poulies, par exemple, assez accentuée pour lui assurer une préférence définitive.

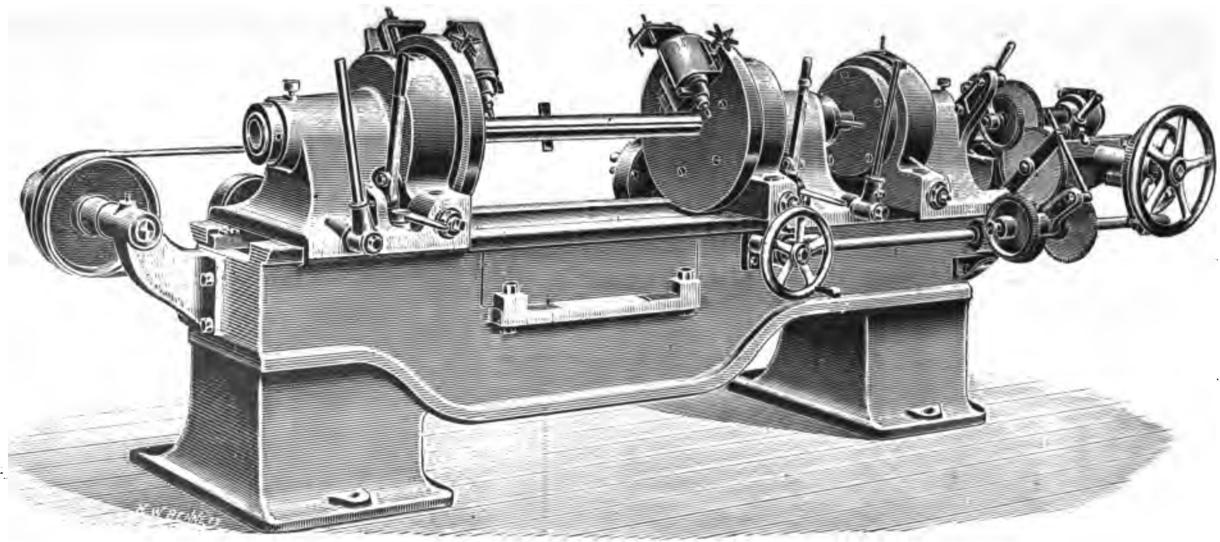
Il y aurait à vous présenter bien d'autres variétés de tours extrêmement intéressants : à roues, à essieux, à billes, à tarauds, à cylindres de laminoirs [*fig.* 13 (*Pl. I*)], etc.; mais, dans l'impossibilité matérielle de le faire, je me bornerai à faire passer sous vos yeux deux derniers types; l'un d'eux est un tour à trois poupées, pour le façonnage des raccords de tuyauterie ([1]), et l'autre un petit tour d'horlogerie ([2]), avec ses accessoires, qui vous montrent bien avec quelle facilité l'on peut, au moyen d'additions très simples, arriver à exécuter sur les tours les travaux les plus divers.

L'Alésoir dérive presque directement du tour par une sorte d'inversion du mode de travail de son outil, qui décrit aussi une hélice, mais dont la forme à réaliser constitue l'enveloppe au lieu d'en être l'enveloppée comme dans le travail du tour. Il en résulte, pour les angles de coupe et les formes de l'outil, quelques différences dont il serait trop long de vous parler ici; mais l'appareil cinématique des alésoirs n'en reste pas moins, en principe, le même que celui des tours, à tel point qu'on se

---

([1]) *Lodge* et *Shipley* (*Traité des machines-outils*, t. II, p. 458).
([2]) *Von Pittler, Chabaud-Latour, Rivett* (*Traité des machines-outils*, t. I, p. 127, 142, 236).

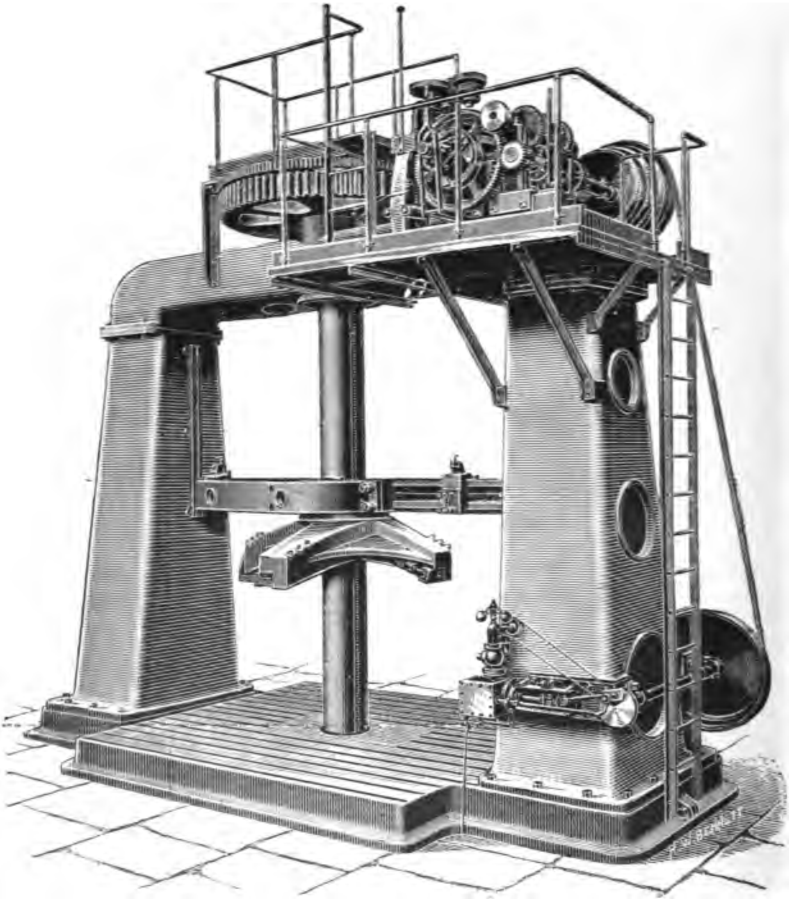
Fig. 14.



Alésoir *Richards*.

Les deux plateaux porte-outils pour le façage et le tournage des brides sont commandés indépendamment et peuvent s'écarter de 915$^{mm}$. Peut aléser sur la barre des cylindres de 500$^{mm}$. Le banc est interrompu, sur une longueur de 760$^{mm}$, par un creux ordinairement rempli par une pièce rapportée, comme sur la figure, et distant de 460$^{mm}$ de l'axe de la barre d'alésage. Cette barre, de 76$^{mm}$ de diamètre, est actionnée, comme les plateaux, par des trains à vis sans fin en acier, tournant dans des bains d'huile, avec butées sur billes.

Fig. 15.

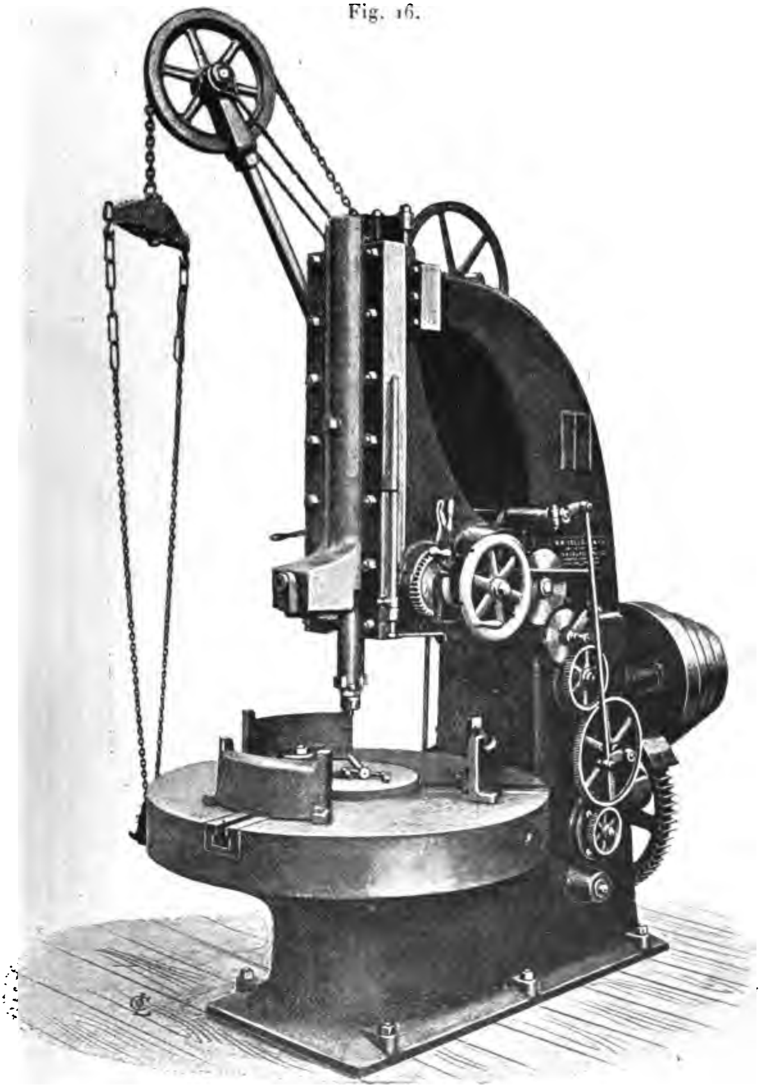


Alésoir vertical *Sellers*.

Diamètre de la barre d'alésage 405$^{mm}$, maximum d'alésage 2$^{m}$,70 sur 3$^{m}$ de haut : du tournage, par deux bras montés sur la barre, 3$^{m}$,05 ; écartement des montants 3$^{m}$,95, hauteur de l'entablement 3$^{m}$,05. Le porte-outils est mené, de la barre, par deux vis, à des vitesses variant de 1$^{mm}$,5 à 35$^{mm}$ par tour, avec rappel rapide sur la barre soit immobile, soit en rotation ; cette barre, actionnée par des pignons droits, plus durables que les vis sans fin, peut se retirer par le haut de l'alésoir sans déranger son mécanisme de commande. L'alésoir, actionné par une petite machine à cylindres de 200 × 200, a son bâti disposé de manière qu'il se tienne de lui-même en parfaite stabilité, sans le secours d'aucun support extérieur, à l'inverse des anciennes machines (*fig.* 2).

sert souvent de tours pour l'alésage des pièces de moyennes

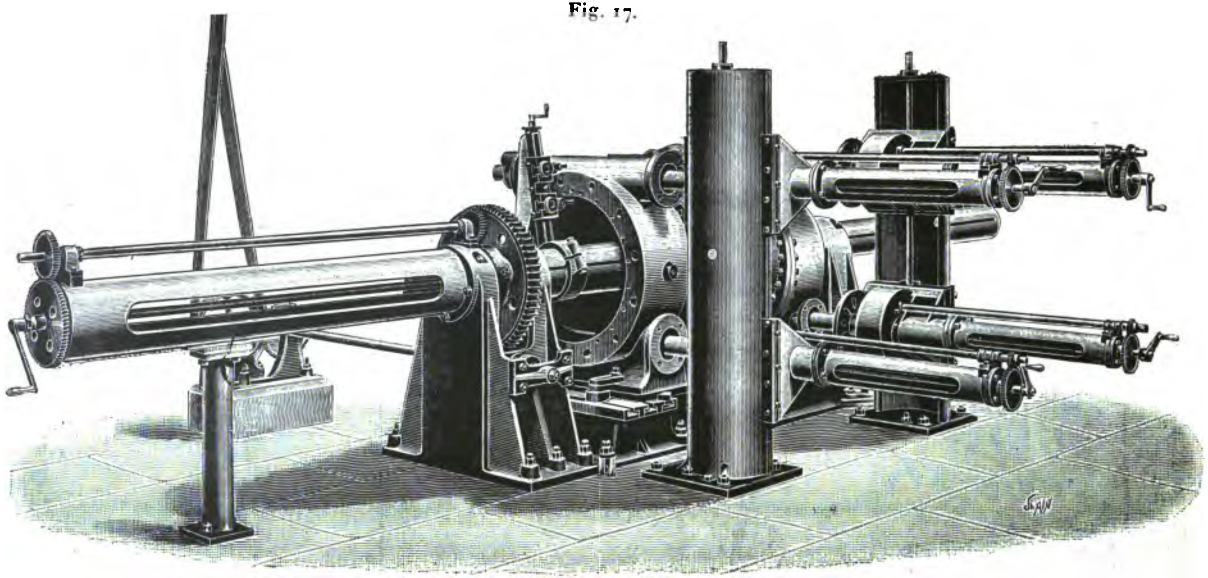
Fig. 16.



Tour alésoir vertical *Sellers*.

Diamètre de la table, 1$^m$,30. Dès sa mise en train, le chuck centre automatiquement la roue en travail sur le plateau dont l'arrêt la dégage aussi automatiquement, ce qui évite les erreurs et pertes de temps. La barre d'alésage, à quatre tranchants, est commandée par plateau de friction avec avances variant de 1$^{mm}$ à 20$^{mm}$ par tour de la table.

Fig. 17.



**Alésoir multiple *Bollinckx*.**

**Disposé pour aléser simultanément et avec des axes rigoureusement orthogonaux le cylindre et les quatre logements des robinets distributeurs des machines Corliss. Les passes finisseuses sont exécutées, non par des lames, mais par des fraises en deux parties, calées sur les barres d'alésage et tournant à une vitesse périphérique de $3^m$ par minute. Peut aléser des cylindres de $400^{mm}$ à $800^{mm}$ de diamètre sur $1^m,25$ à $1^m,80$ de course.**

dimensions. De même que le tour, l'alésoir peut se disposer horizontalement (*fig.* 14) ou verticalement (*fig.* 15), disposition qui convient plus spécialement à l'alésage des grands diamètres, comme celui des cylindres de machines soufflantes, ou encore, avec des mécanismes tout à fait analogues à ceux des tours verticaux, à l'alésage des roues et poulies (*fig.* 16); c'est l'outil universellement employé aux États-Unis pour l'alésage des moyeux des roues de wagons.

Parmi les spécialisations de l'alésoir, je citerai les *alésoirs multiples,* dont voici (*fig.* 17) un remarquable exemple, et les nombreux types portatifs, permettant de travailler sur place des cylindres de locomotives, les brides d'arbres d'hélices, les étambots, etc., et je terminerai cette courte revue d'alésoirs, en vous signalant les types dits *alésoirs universels,* dont vous comprendrez, par l'exemple que je mets sous vos yeux ([1]), la facilité avec laquelle ils permettent d'aléser les pièces de formes les plus complexes dans tous les sens et d'exécuter notamment, avec une précision absolue, les alésages orthogonaux, si fréquents dans les pièces de machines.

Le travail de l'outil est, dans la RABOTEUSE, essentiellement le même que dans le tour, ce qui se conçoit aisément, en remarquant que le rabotage d'une surface plane peut être considéré comme le tournage d'un cylindre de diamètre infini : mais, par cette raison même, ce travail est forcément discontinu. En général, dans la plupart des raboteuses, le travail ne s'effectue et l'outil n'agit que pendant l'aller de la table qui porte les pièces à raboter, le retour s'effectue à vide. De là, pour réduire au minimum la perte de temps, des mécanismes très ingénieux, parmi lesquels on peut citer au premier rang celui de *Sellers,* disposé afin d'accélérer le plus possible le retour de la table ([2]). Mais il est difficile d'accélérer beaucoup ce retour sans chocs et sans complications, et il semble bien plus rationnel de faire travailler l'outil dans les deux sens. La perte

---

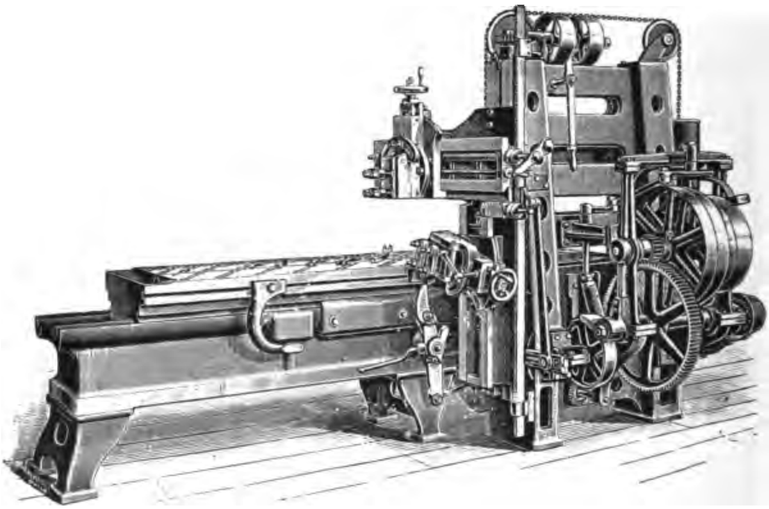
([1]) Alésoir des *Niles Tool Works* (*Traité des machines-outils,* t. I, p. 68).

([2]) *Traité des machines-outils,* t. I, p. 279.

de temps se trouve ainsi réduite au minimum; et l'on a combiné, dans ce but, un grand nombre de porte-outils, dont quelques-uns, relativement simples, ont donné de bons résultats, en général trop ignorés des constructeurs.

Ainsi que vous le voyez par l'exemple que je mets actuellement sous vos yeux ([1]), les raboteuses atteignent parfois des

Fig. 18.



Raboteuse ouverte de la *Detrick and Harvey Machine C°*.

Table mobile de $4^m,80$ de course le long d'un montant à deux porte-outils équilibrés, dont l'un sur un bras latéral en porte à faux; poids, 20 tonnes. (Pour les détails du mécanisme, voir mon *Traité des machines-outils*, t. I, p. 294.)

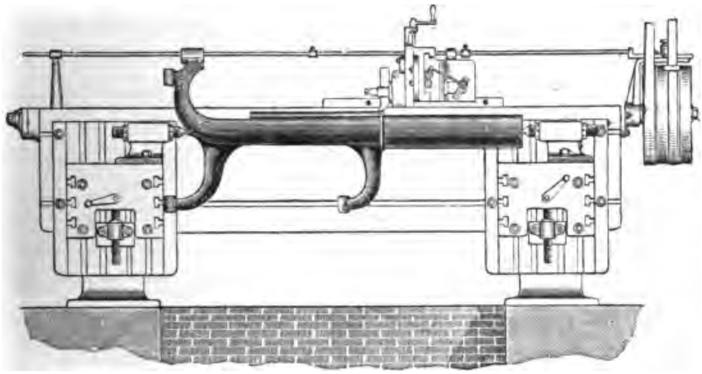
dimensions colossales : $9^m$ de course et $0^m,50$ de large. Néanmoins, malgré ces dimensions, certaines pièces très longues, ou d'une forme particulière, ne trouvent pas à se placer convenablement sur les tables. C'est en partie pour y remédier que l'on a été amené à la construction des ***raboteuses ouvertes*** ou ***latérales***, dont la photographie que vous avez maintenant devant vous représente (*fig.* 18) un excellent exemple. L'ouver-

([1]) Raboteuse des *Niles Tool Works* (*Traité des machines-outils*, t. I, p. 273).

ture de la machine, constituée par l'absence d'un des montants, permet, comme vous le voyez, d'aborder la table par toute sa longueur sans aucun obstacle et de traiter ainsi, avec une machine relativement petite, des pièces dont la forme spéciale ou l'étendue rendrait nécessaire l'emploi de raboteuses beaucoup trop grandes pour la moyenne de leurs travaux courants.

D'autre part, à mesure que les dimensions de la table augmentent, sa manœuvre devient de plus en plus difficile et

Fig. 19.



Exemple d'un travail exécuté sur une raboteuse radiale *Richards*.

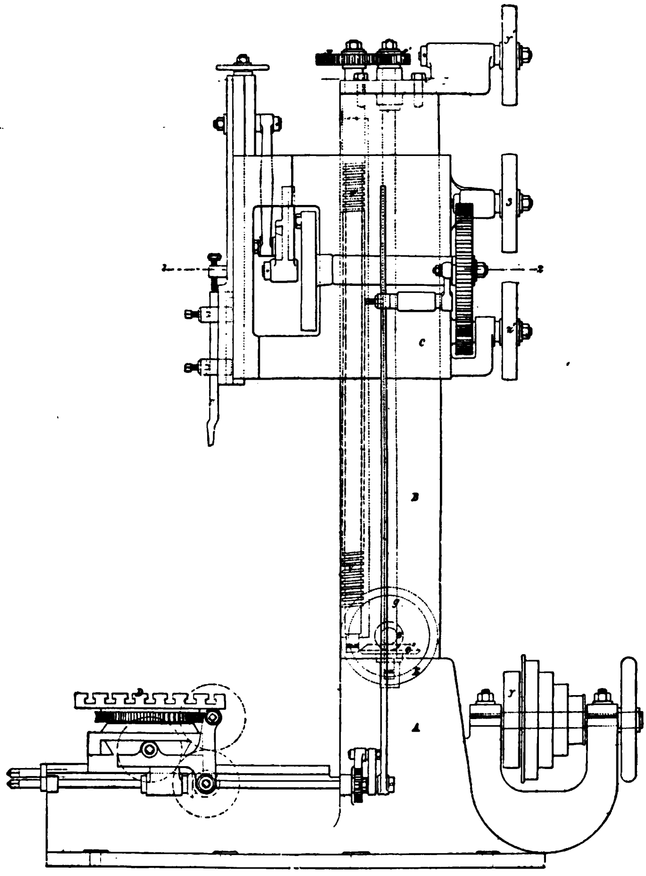
Rabotage d'une colonne de machine à percer montée sur les pointes des deux tables de la raboteuse, dont l'outil est monté sur un bras en porte à faux mené par une vis.

onéreuse par les résistances d'inertie et de frottement qu'elle entraîne, de sorte que l'on a été conduit, pour les raboteuses destinées à travailler constamment des pièces très lourdes, à fixer la table et ces pièces et à rendre, au contraire, mobiles les outils, leurs montants et leurs traverses. Les *raboteuses à fosse* présentent un exemple bien connu de cette interversion, que l'on retrouve sous la forme de raboteuses latérales dans les machines de *Richards* (*fig.* 19) et dans les chanfreineuses pour tôles, ainsi que vous le reconnaissez facilement sur ces projections.

Au lieu d'imprimer à l'outil de la raboteuse un mouvement de translation horizontal, imprimez-lui un mouvement de va-

et-vient vertical ou incliné, toujours dans le même plan, et vous obtiendrez l'outil connu sous le nom de MORTAISEUSE, dont

Fig. 20.



Mortaiseuse à colonne de *Pihet*.

Le porte-outil a est commandé par une transmission à courroies a' *z y'*, qui permet à son chariot *c*, afin d'amplifier la course de l'outil, de monter et descendre sur la colonne B par la vis *v* que commande le train *e e' g p'*. (Un modèle de cette machine existe au *Conservatoire des Arts et Métiers.*)

la *fig.* 20 vous présente un excellent type, pourvu, comme vous le voyez, d'une table qui peut, automatiquement ou à la

main, se déplacer suivant deux directions orthogonales et pivoter autour d'un axe vertical, de manière à se prêter au dressage automatique des faces verticales, planes ou cylindriques, aussi bien qu'au mortaisage proprement dit.

Si l'on imprime à l'outil son mouvement alternatif dans un plan non plus vertical, mais horizontal, on réalise la machine connue sous le nom d'ÉTAU LIMEUR, parce que le travail de son outil peut se comparer à celui d'une lime très puissante, travaillant une pièce à l'étau suivant un gabarit quelconque, rapidement et avec une grande précision.

Donnons maintenant à l'outil deux séries de mouvements, automatiques ou facultatifs, alternatifs ou continus, dans des plans orthogonaux, horizontal et vertical, et nous obtiendrons les grandes machines connues sous le nom de RABOTEUSES UNIVERSELLES. Cette duplication et ce croisement des mouvements de l'outil donnent forcément à ces machines un aspect compliqué, mais leur fonctionnement est en réalité fort simple. Elles rendent de grands services dans les ateliers importants, où l'on a à raboter sur plusieurs faces, presque toujours à angle droit, des pièces lourdes, d'un maniement délicat, comme, par exemple, les cylindres des machines marines. Leur emploi, très fréquent en Angleterre, commence à se répandre chez nous, malgré leur prix élevé ([1]).

Vous voyez, par ces quelques exemples, avec quelle simplicité les différentes espèces de raboteuses dérivent les unes des autres par des modifications rationnelles du type primitif, en vue de genres de travaux spéciaux; de sorte qu'il se manifeste, dans cette variété de modèles en apparence indépendants les uns des autres, une unité d'origine des plus remarquables. On sait d'ailleurs qu'il en est de même pour la plupart des applications importantes de la Mécanique appliquée, notamment en qui concerne les machines thermiques, dans lesquelles on retrouve, comme réellement essentielle, au milieu des organismes les plus différents, l'utilisation de quelques cycles fondamentaux, toujours les mêmes.

---

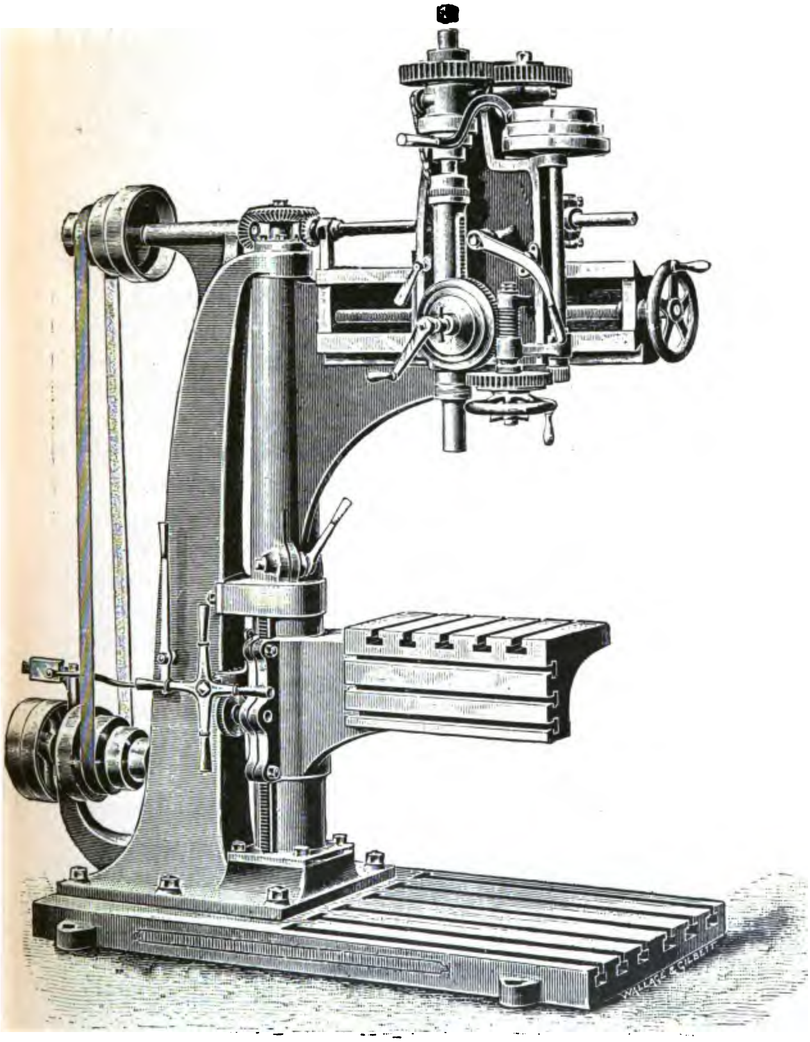
([1]) Types de *Barrow* et *Shanks* et de *Hulse* (*Traité des machines-outils*, t. I, p. 342 et suivantes).

L'on retrouve, dans le travail de l'outil des PERCEUSES, la continuité de ceux des tours et de l'alésoir. En fait, le foret, bien souvent, alèse son trou en même temps qu'il le perce, et l'on peut très facilement opérer sur le tour des travaux de perçage. Néanmoins, la nature du travail du foret est bien particulière, en ce sens qu'il s'opère dans des conditions toutes différentes et plus défavorables en ce qui concerne le rafraîchissement et le dégagement de l'outil. Cet outil pénètre, en effet, dans la matière, en même temps qu'il tourne, avec une vitesse qui dépend de la grosseur du trou, de la nature de la matière en jeu, et aussi des précautions prises pour éviter l'échauffement de l'outil qui, bien plus que sa solidité même, en limite le débit. Ici, comme pour les autres machines, ne pouvant entrer dans aucun détail relatif au travail même du perçage, je me bornerai à vous rappeler le remplacement, aujourd'hui presque universel, des anciens forets triangulaires ou à mèches par les forets en hélice, dits forets *tors* ou *américains*, plus solides, d'un affûtage plus facile et plus précis, d'un travail à la fois plus rapide et plus exact, parce qu'ils sont mieux guidés automatiquement, par leur fonctionnement même, dans les trous qu'ils percent.

Le foret ne doit pas seulement avancer, comme nous venons de le voir, avec des vitesses variables, ce qui exige déjà des mécanismes spéciaux, mais pouvoir atteindre la pièce en travail sur une étendue considérable et sous toutes les inclinaisons; c'est ce que l'on obtient à l'aide des perceuses *radiales*, dont la figure ci-contre (*fig.* 21) vous fera facilement comprendre le fonctionnement. Dans ces machines, le chariot porte-foret peut à la fois glisser et parfois pivoter sur un bras horizontal, orientable parfois sur son axe, capable de tourner et aussi quelquefois de se lever sur une colonne verticale.

Il va sans dire que l'on n'a pas toujours besoin d'une pareille universalité des mouvements du foret; on en profite pour simplifier le plus possible les perceuses par la suppression des mouvements inutiles, notamment en ne conservant plus au chariot qu'un seul déplacement horizontal ou vertical. Cette simplification permet, en même temps, de rendre le travail

Fig. 21.



Petite perceuse radiale *Archdale*.

**Bras de 0m,75 de rayon, pouvant se fixer dans une orientation quelconque autour de sa colonne par le serrage d'un boulon; porte-foret équilibré avec avance automatique ou à la main. Table pouvant monter ou descendre de 230mm sur la colonne et se dérober entièrement.**

plus précis et plus rapide, parce que la machine, débarrassée d'une foule d'articulations et des porte à faux, devient beaucoup plus robuste et plus stable. C'est d'ailleurs une loi générale, applicable non seulement aux machines-outils, mais à presque tous les mécanismes : que la rapidité, la précision et l'économie de leur travail augmentent avec leur spécialisation.

Ces spécialisations sont, pour les perceuses, d'une très grande variété : perceuses *multiples* [*fig.* 22, et 23 (*Pl. I*)], à bancs, à colonnes, mortaiseuses, pour rails, pour lingots, poulies, cardes, tubes, trous polygonaux, etc.; je me bornerai, pressé par le temps, à vous signaler plus particulièrement deux de ces variétés; les perceuses *portatives* et les perceuses *multiples pour chaudières* montées. La plus simple des perceuses portatives est l'outil à la main que chacun connaît sous le nom de *rochet;* puis viennent les petites perceuses mécaniques à corde, à air comprimé, hydrauliques, électriques, etc., que l'on transporte facilement aux points les plus dérobés des travaux, et qui, groupées sur des châssis convenablement disposés, permettent d'attaquer simultanément le travail en un grand nombre de points. Les perceuses multiples pour chaudières montées, font de même. Elles sont, comme leur nom l'indique, destinées à percer, dans les tôles des chaudières assemblées provisoirement, les trous des rivets qui en feront l'assemblage définitif. Ces trous sont percés sans détérioration de la tôle, avec une exactitude parfaite, évitant ainsi aux rivets toute fatigue inutile. Dans la plupart de ces machines, la chaudière, placée sur un plateau diviseur automatique, tourne entre deux montants porteurs de forets qui, après avoir percé leurs trous aux divisions indiquées, se retirent automatiquement, puis reprennent leur travail dès que le plateau a tourné d'une nouvelle division ou d'un pas de la rivure. L'emploi de ces machines est des plus avantageux, presque indispensable même pour la construction des grandes chaudières marines cylindriques, contre lesquelles la lutte est si activement poursuivie par les chaudières tubulées ou à petits éléments [1].

---

[1] *Traité des machines-outils*, t. I, p. 476.

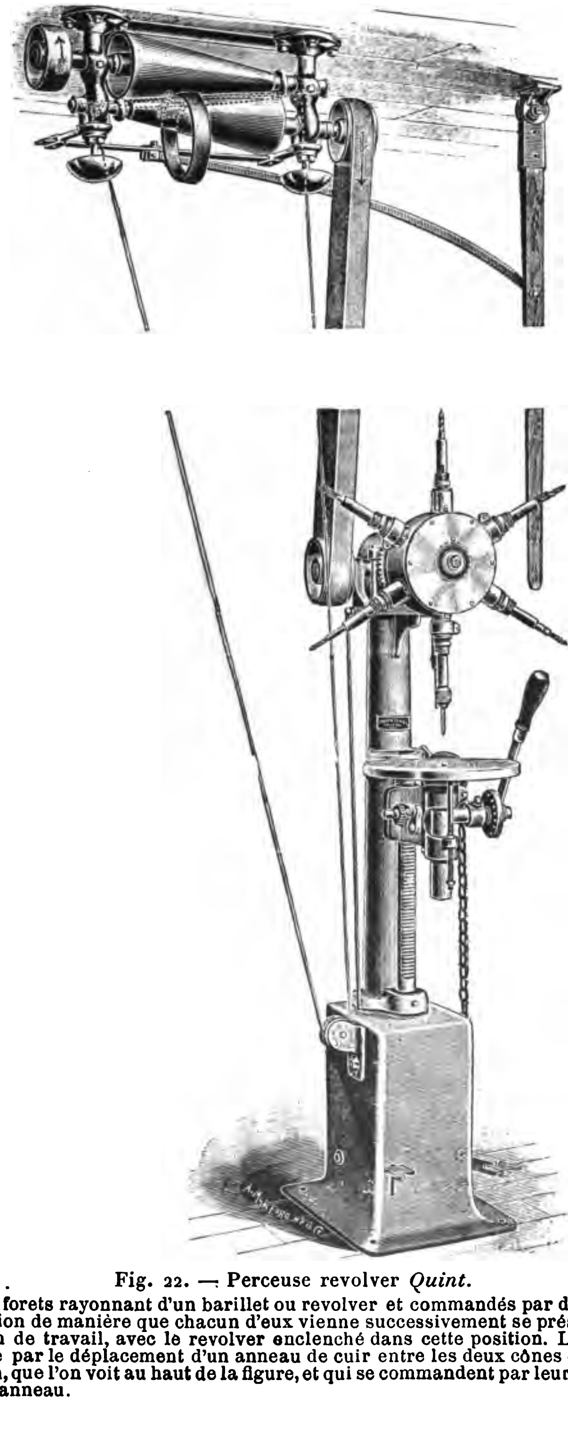
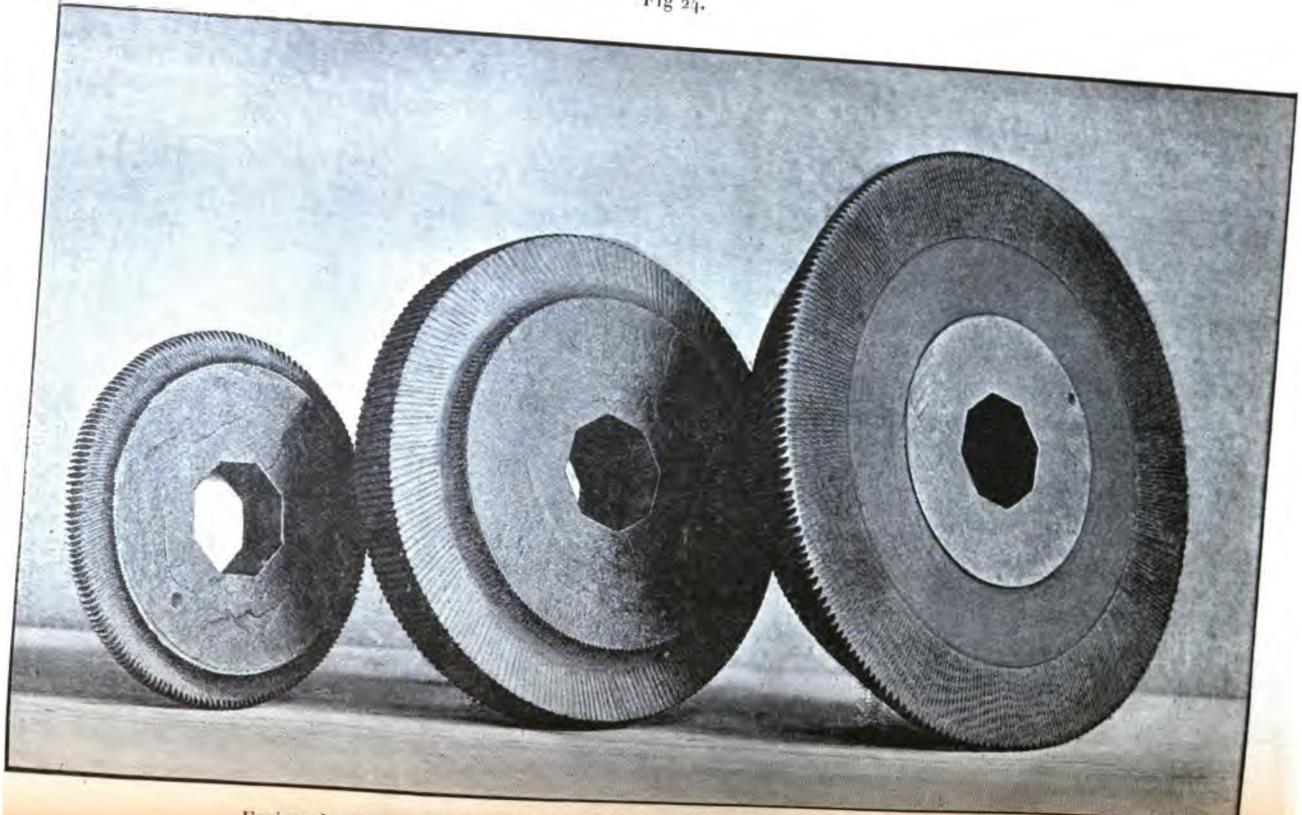


Fig. 22. — Perceuse revolver *Quint.*

A six forets rayonnant d'un barillet ou revolver et commandés par des galets de friction de manière que chacun d'eux vienne successivement se présenter en position de travail, avec le revolver enclenché dans cette position. La vitesse se règle par le déplacement d'un anneau de cuir entre les deux cônes de transmission, que l'on voit au haut de la figure, et qui se commandent par leur pression sur cet anneau.

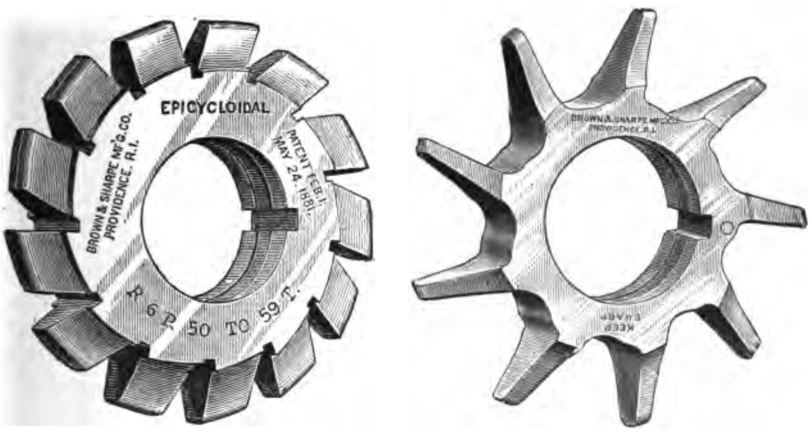
Fig 24.



Fraises de *Vaucanson* (Collections du *Conservatoire des Arts et Métiers*).

Les machines-outils dont je viens de vous parler, constituent comme la partie pour ainsi dire classique de cette branche de la Mécanique, en ce sens que leur usage est universel et date, du moins sous leurs formes les plus usuelles, de l'origine même de la machinofacture moderne; je vais aborder maintenant l'examen d'un genre de machine plus moderne, dont l'introduction a déjà presque révolutionné le travail des mé-

Fig. 25.



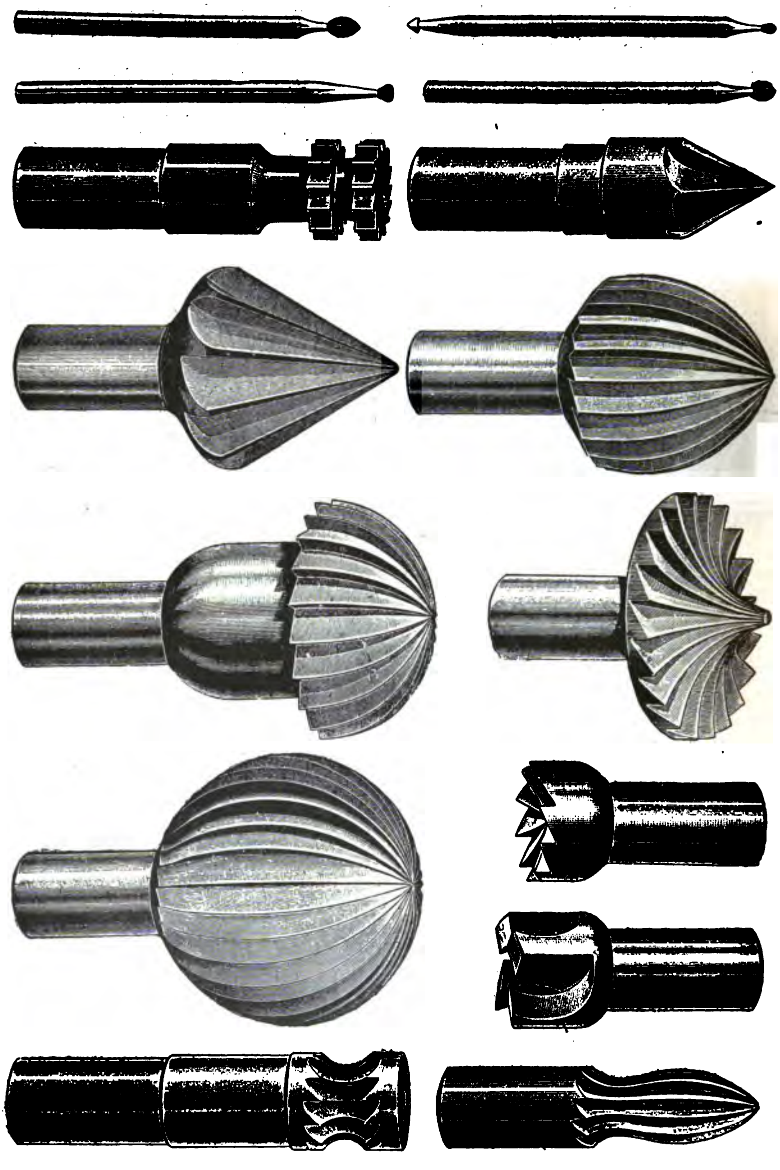

Fraise épicycloïdale *Brown* et *Sharpe* neuve et après avoir fraisé une longueur de 2240$^{m}$.

Spéciale pour la taille des pignons. Ces fraises peuvent être affûtées jusqu'à usure complète, sans perdre leur profil, en affûtant leurs dents sur le devant. Elles portent, sur le dessus des dents, un trait qui indique la trace de leur plan médian, afin de faciliter le montage de la fraise sur la machine, tel que ce plan passe par l'axe de la roue à tailler. Les creux des dents taillées par ces fraises ont au fond un jeu égal au dixième de l'épaisseur des dents, et comme cette épaisseur est égale à la largeur des creux du cercle primitif, toutes les roues d'un même pas peuvent engrener sans choc.

taux, et dont l'influence toujours croissante fait chaque jour progresser en économie et en précision la pratique si difficile du constructeur. Je veux parler des FRAISEUSES.

Bien que l'emploi si étendu, presque universel aujourd'hui, des fraiseuses soit de date relativement récente, la *fraise* elle-même était connue depuis longtemps. La *fig*. 24 représente trois de celles dont se servait *Vaucanson* vers 1740. Ce sont,

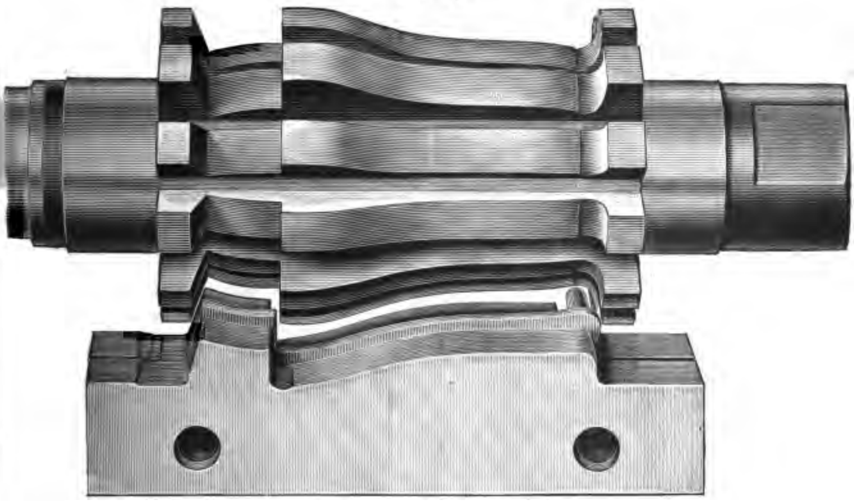
Fig. 26.



Fraises de forme de la *Faneuil Watch Tool C°*, grandeur d'exécution

comme vous le voyez, des fraises à profil ondulé, du genre de celles que l'on appelle *fraises de forme;* et il est certain que Vaucanson en sut faire un excellent usage pour la construction de ses merveilleuses mécaniques; mais, pour arriver à généraliser l'emploi de ces fraises, il a fallu, d'une part, créer tout un monde de machines adaptées aux travaux si multiples

Fig. 27.



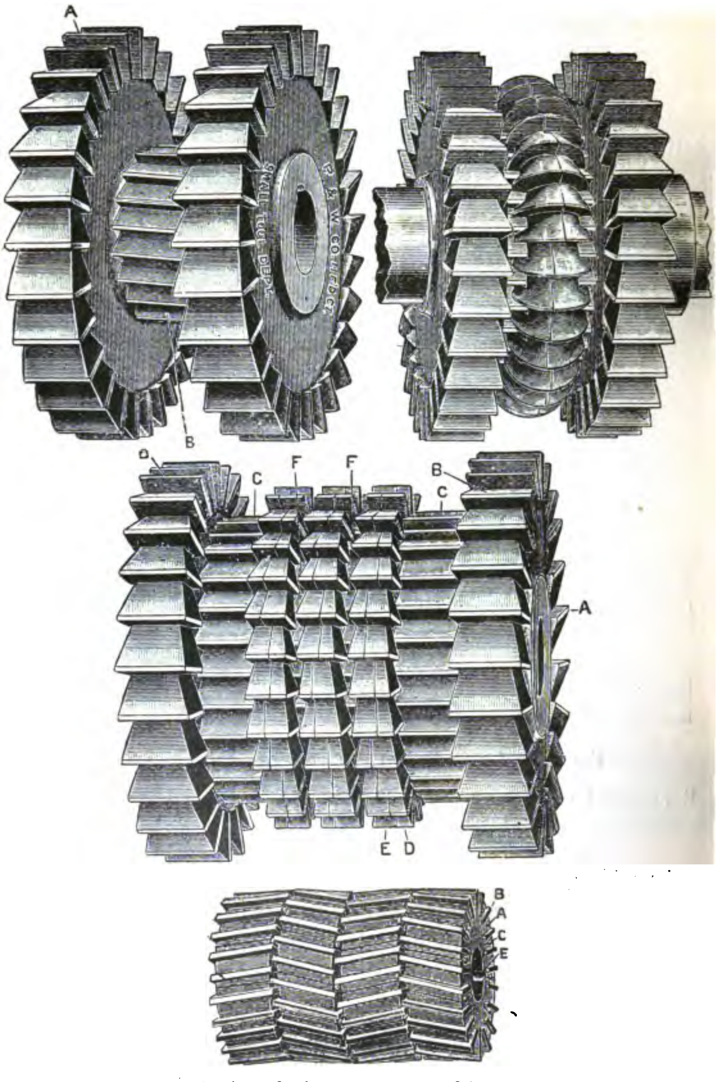
Fraise de forme *Brown* et *Sharpe* à trois éléments,

Représentée en train de travailler une pièce d'acier de 75$^{cm}$ de long, prise entre les mâchoires appropriées de l'étau.

et si variés qui en comportent l'usage, puis d'autres machines, extrêmement ingénieuses aussi, pour tailler et affûter, mécaniquement et avec une exactitude parfaite, les dents de ces fraises en acier trempé et de profils parfois si tourmentés (*fig.* 25 à 39).

Parmi les fraiseuses, la plus parfaite, au point de vue de la multiplicité de ses travaux, est celle que l'on a caractérisée par le nom parfaitement justifié de *fraiseuse universelle.* Elle est définie par la propriété de pouvoir tailler automatiquement des spirales coniques d'un pas quelconque. Dans la plupart de

Fig. 28.

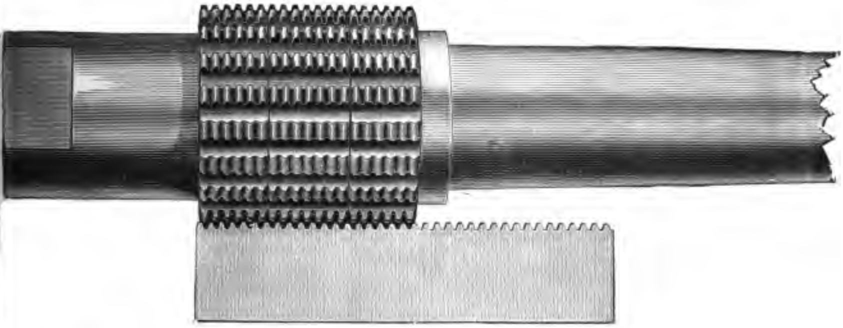



Fraises de forme *Pratt-Whitney*.
En éléments assemblés A, B, C, ..., pleins ou à dents rapportées.

ces fraiseuses, comme, par exemple, pour celle de la figure ci-

après (*fig.* 40), la fraise ne fait que tourner, montée sur un arbre horizontal, et il faut alors, pour que la condition de l'uni-

Fig. 29.

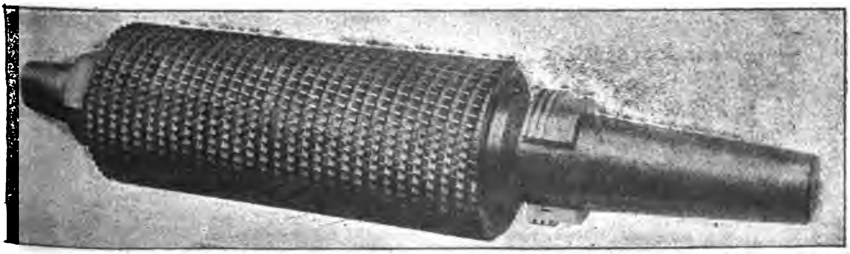


Fraise *Brown* et *Sharpe*.

Pour la taille des crémaillères, en trois parties faisant chacune six dents.

versalité soit résolue, que la pièce à fraiser puisse prendre automatiquement un mouvement hélicoïdal autour d'un axe incliné

Fig. 30.

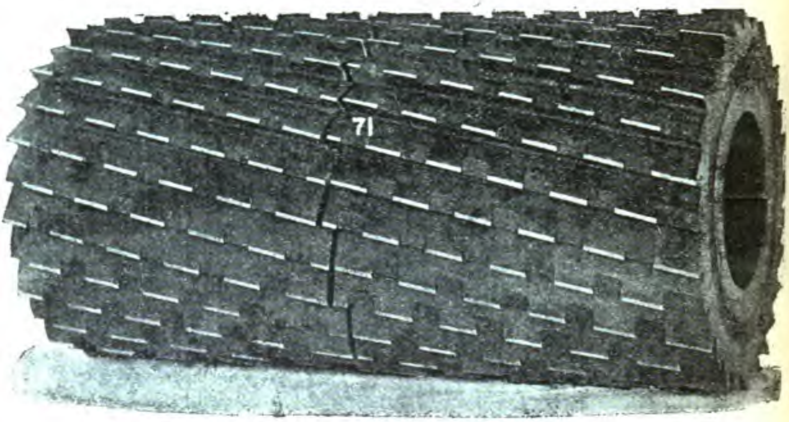


**Fraise ébaucheuse hélicoïdale *Muir*.**

**Diamètre 230mm; longueur 560mm. Dents étagées en hélice de manière à agir d'une façon continue, rapide et sans engorgement.**

sur celui de l'arbre porte-fraise. A cet effet, la table horizontale que vous voyez en avant de la *fig.* 40 peut se mouvoir autour d'un axe vertical et recevoir, dans toutes ses positions, un

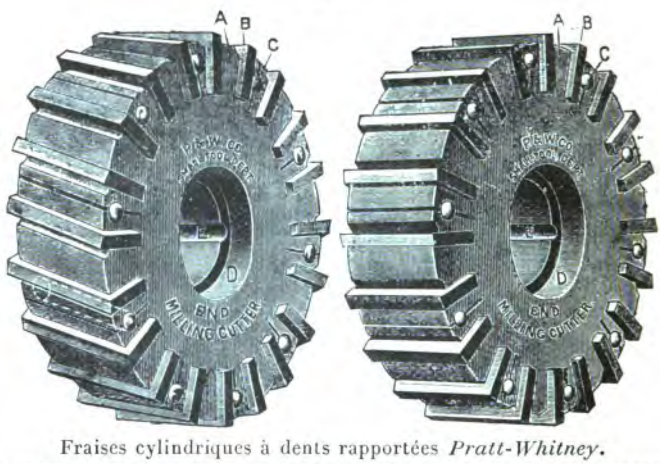
Fig. 31.




Fraise ébaucheuse à dents alternées *Brown* et *Sharpe*.
Diamètre 150$^{mm}$, longueur 300$^{mm}$.

mouvement de translation longitudinale automatique ; et la

Fig. 32.

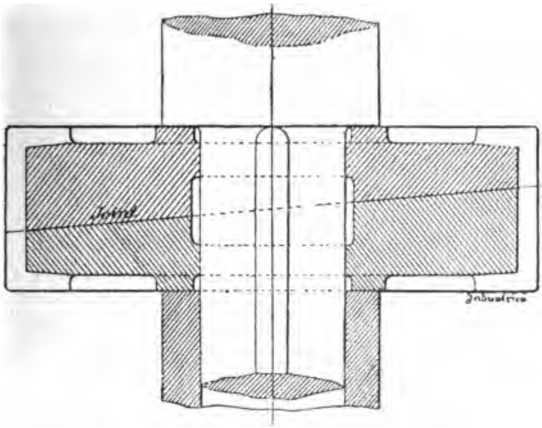



Fraises cylindriques à dents rapportées *Pratt-Whitney*.
D, corps de fraise, avec cale ronde E, divisé en segments A, serrés sur les lames B par les cales C.

pièce à fraiser, montée entre deux pointes ou saisie par un

mandrin, est actionnée par un mécanisme appelé *genouillère* (*fig.* 41 et 42), qui lui imprime, autour d'un axe parallèle ou

Fig. 33.

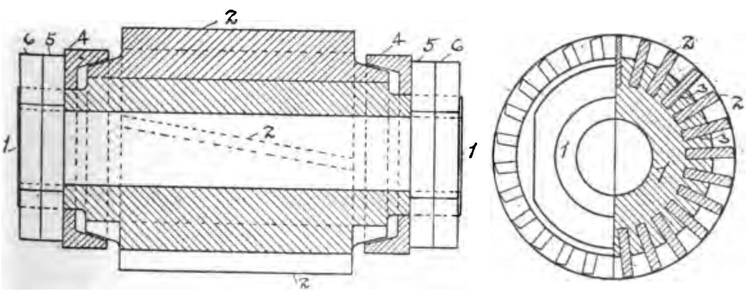



Fraise en deux parties avec joint diagonal *Lister*.

Ce joint, dont le passage ne laisse pas de trace sur la coupe, permet de conserver à la fraise une largeur constante, malgré l'usure de ses faces, que l'on rattrape par un remplissage inséré dans le joint.

incliné sur la table, un mouvement de rotation proportionnel

Fig. 34.



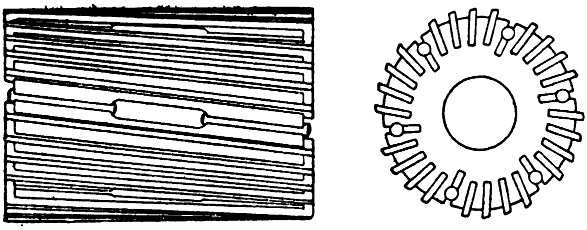
Fraise *Mac Adam*.

A lames $z$, emboîtées dans le corps 1, et serrées par les frettes 4, 4, à écrous 5, 6.

à l'avancement longitudinal de cette table. C'est une réalisation des plus simples du mouvement de fraisage universel tel que je

l'ai défini tout à l'heure. En outre, la table peut recevoir, auto-

Fig. 35.

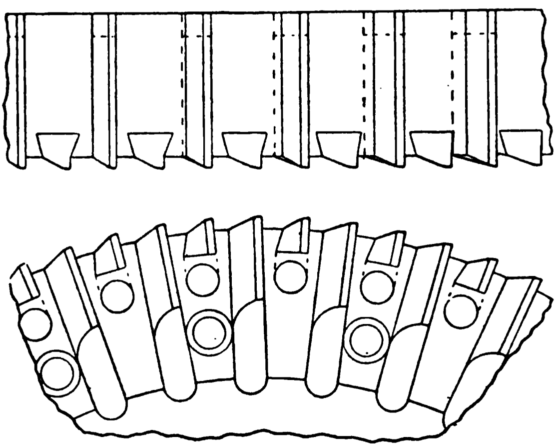


Fraise cylindrique à dents rapportées *Richards*.

Spéciale pour le rabotage de la fonte. Lames engagées dans des rainures fraisées, puis serrées par des cales coniques en acier dur, enfoncées entre les segments du corps de fraise en acier Bessemer. On enfonce une cale toutes les quatre lames, et, pour les longues fraises, le corps est creusé en son milieu d'encoches permettant de diviser chaque cale en deux petites cales faciles à chasser pour remplacer les lames.

matiquement ou à la main, un mouvement transversal parallèle

Fig. 36.



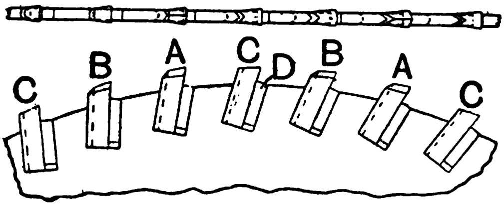
Fraise radiale à dents rapportées.

à l'arbre porte-fraise, et sa console un mouvement vertical qui

permet de régler la distance ou la hauteur de la fraise à la table.

Par la variété de ses contours (*fig.* 26, 27, 28), la précision (*fig.* 24), la douceur et la continuité de son action, la fraise est, par excellence, l'outil tout indiqué pour les travaux d'exactitude et de profilage proprement dits : elle permet d'exé-

Fig. 37.

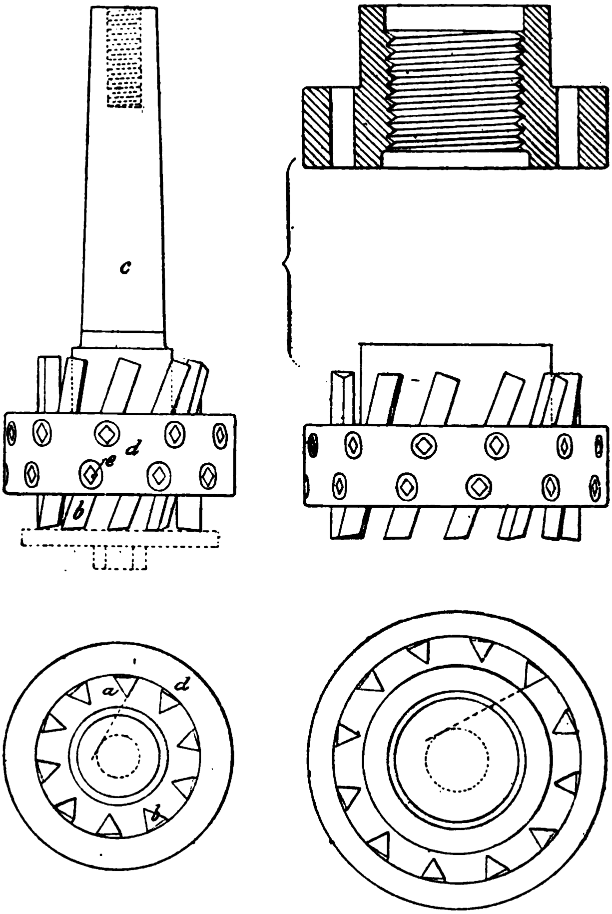



Fraise-scie ou coupeuse à dents rapportées.

Diamètre $1^m,20$, épaisseur $14^{mm}$. 48 dents en seize séries de trois types A, B et C, en saillie de $10^{mm}$, à cales D. Longueur des dents $70^{mm}$, épaisseur $17^{mm}$.

cuter d'une seule passe, avec une similitude absolue, des formes qui ne pouvaient être réalisées que par des passes nombreuses de plusieurs outils différents, dont le travail plus lent ne pourrait jamais avoir la précision de celui de la fraise indéformable et taillée exactement au profil à reproduire. Il va d'ailleurs de soi que ce travail peut, comme avec le tour et la raboteuse, s'exécuter automatiquement par la méthode générale des gabarits, qui consiste [*fig.* 44 (*Pl. I*)] à imprimer soit à la table qui porte les pièces à travailler, soit à l'outil lui-même un mouvement commandé par sa liaison avec une glissière ou gabarit profilé semblablement aux contours qu'il s'agit de reproduire. La fraise, grâce à la variété et à la petitesse de ses formes, et par la douceur de son fonctionnement, se prête mieux que tout autre outil à l'exécution de ces reproductions parfois très délicates. De là, toute une famille de *fraiseuses façonneuses* ou *à copier*, des plus fécondes, dont la monographie s'étend depuis les grandes machines à façonner les bielles et les manivelles des moteurs à vapeur jusqu'aux petits appareils à fabriquer les platines de montre ou les pièces les

Fig. 38.




Fraises à dents rapportées *Ducommun*.

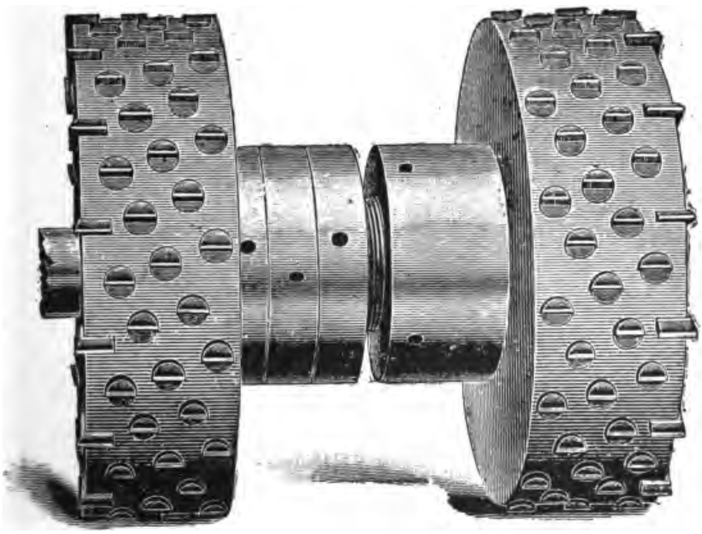
*c*, broche d'une seule pièce ou filetée avec le corps *a* de la fraise; *b*, outils engagés en *a*, maintenus par la frette *d* et les vis *e*, et alignés au moyen de la plaque indiquée en pointillés.

plus délicates des machines à coudre, appareils dont l'étude est des plus intéressantes et des plus suggestives pour tous les mécaniciens. C'est à cette famille de fraiseuses qu'il faut rattacher notamment les machines à *tailler les fraises* et les

forets, dont l'emploi a, comme nous l'avons dit, rendu pratique celui même de la fraise ([1]).

Je ne puis insister plus longtemps sur ces caractères de précision, de rapidité et d'adaptabilité universelle qui recommandent l'emploi de la fraise pour les travaux de petite et de moyenne importance, et lui ont acquis une supériorité in-

Fig. 39.



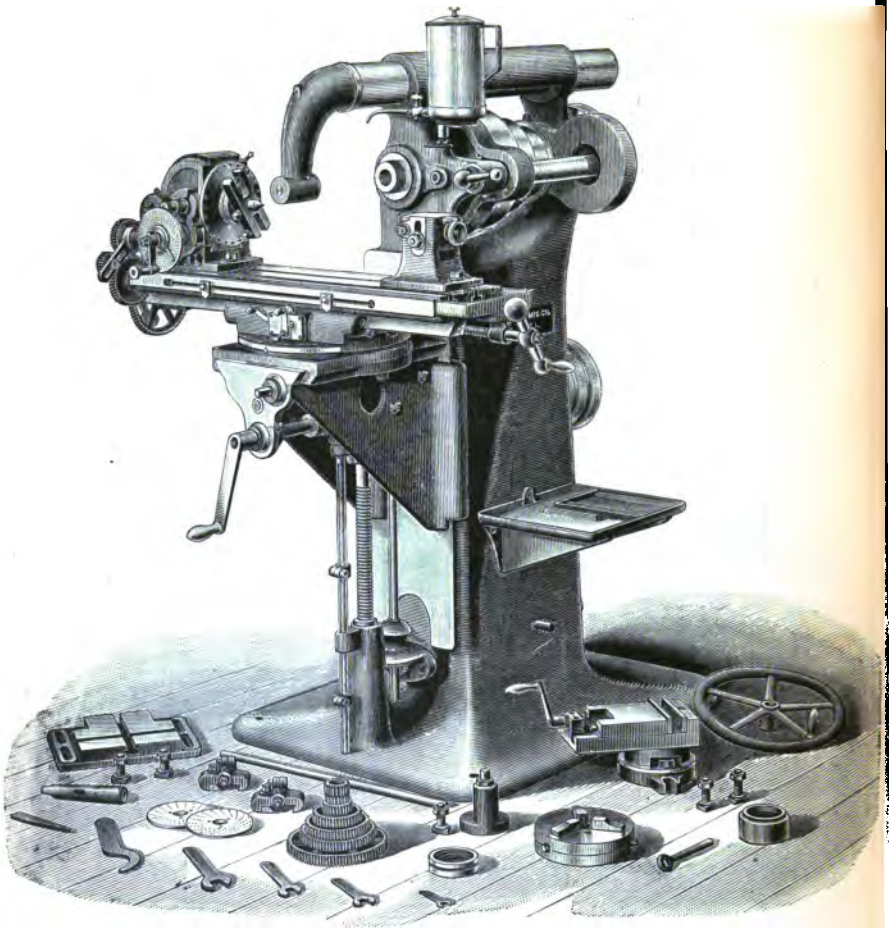
Fraise à boutons *Ingersoil.*

Corps en acier, avec tiges ou boutons en acier insérés de manière à se succéder par alignement rompu en une taille presque continue et très uniforme. Épaisseur des fraises 75$^{mm}$, diamètre 250$^{mm}$.

contestable, d'ailleurs universellement reconnue aujourd'hui; mais la fraise possède aussi la supériorité du rendement et de la précision même pour les gros travaux; elle peut devenir, convenablement maniée, le plus puissant des outils. On s'en convaincra facilement par la vue seule de cette projection, qui est la photographie même du travail d'une fraise puissante :

([1]) Machines de *Bonnaz, Bariquand, Bouhey, Frey, Kreutzberger,* etc. (*Traité des machines-outils,* t. II, p. 149 et suivantes).

Fig. 40.



Fraiseuse universelle *Brown* et *Sharpe*.

Le support ou nez de l'arbre ou broche porte-fraise, à 140$^{mm}$ au-dessus de cette broche, peut se retourner ou s'enlever. La table, de 900$^{mm}$ × 204$^{mm}$, peut pivoter de 45° sur sa console, descendre à 445$^{mm}$ au-dessous de l'axe de la broche et se déplacer transversalement de 165$^{mm}$. Course longitudinale 520$^{mm}$, automatique, avec taquets d'arrêt réglables à volonté, et à douze vitesses variant de 0$^{mm}$,125 à 3$^{mm}$,75 par tour de la broche. Des rondelles graduées sur les axes de leurs vis de commande marquent, à un cinquantième de millimètre près, les déplacements verticaux et transversaux des chariots. Poupée à diviseurs, ou genouillère, pouvant pivoter dans un plan horizontal et s'incliner de 10° au-dessous de l'horizontale à 10° au-delà de la verticale, ainsi que la contre-pointe.

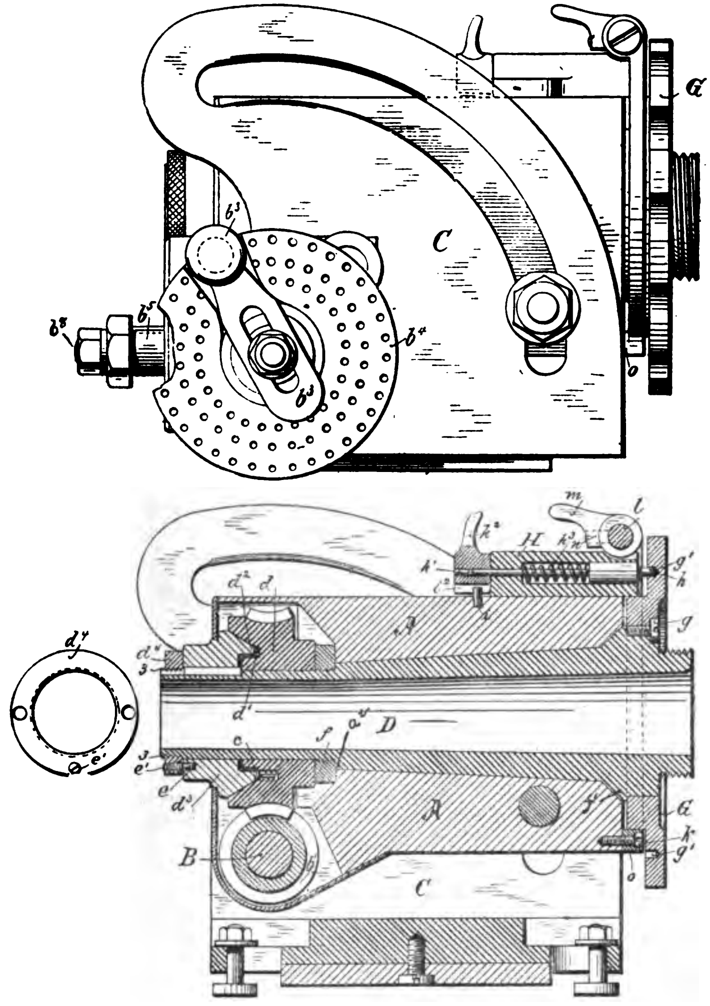
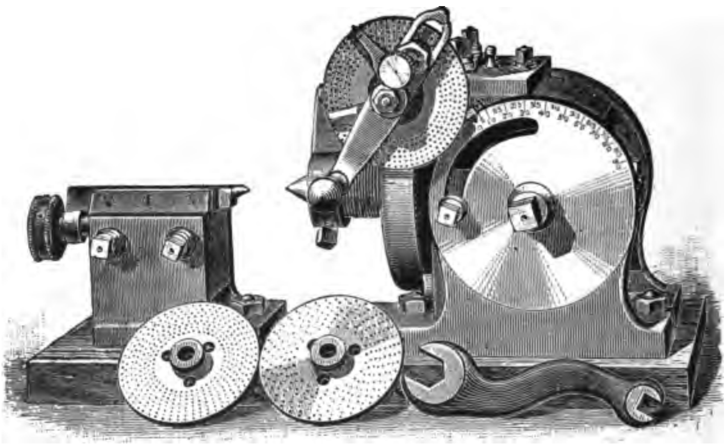



Fig. 41. — Genouillère *Brown* et *Sharpe*.

D, broche en acier trempé et rodé, pivotée dans le palier A, avec collet conique *f* et serrage sur la portée $a^2$ par l'écrou *f*, entraînée par le pignon hélicoïdal *d*, à embrayage à friction $d^3 d^2$, avec ressorts de rappel *c, c, c* et serrage au moyen de l'écrou $d^4$, à mouvement limité par la prise de son piton *e'* dans l'encoche circulaire *e* de $d^3$. Cette disposition permet de faire, au besoin, tourner l'axe D à la main pour ne pas fatiguer inutilement la vis B*b*. G, plateau diviseur à la main, fixé sur D par les vis *g, g, g*, orienté par la pénétration, dans ses encoches *g'*, du cliquet *h*, à doigt $h^2$, guidé par $i\,i^2$ dans le canon H, à rappel $h^3$, puis maintenu par le serrage, au moyen de la vis *ml*, du plateau *k*, fixé sur A par les vis *o, o*. C, C, joues à coulisses circulaires, entre lesquelles A pivote autour de B. $b^3 b^4$, second diviseur commandant la vis de B, après débrayage de G, et permettant ainsi d'actionner mécaniquement D par l'arbre $b^5 b^8$, que commande le train de pignons variables indiqué à gauche de la *fig.* 40, de manière à tailler des hélices de pas divers.

vous voyez sous quelle largeur et avec quelle allure elle attaque, sur ses deux côtés à la fois, la pièce en travail. Son échauffement est, à puissance ou à débit égal de copeaux par unité de temps, bien moindre que celui de l'outil du tour ou de la raboteuse, dont le tranchant, enfoui dans sa coupe, ne

Fig. 42.



Genouillère à double diviseur *Brainard.*

Spéciale pour les divisions très fines, la taille des roues, etc., avec pignon hélicoïdal extérieur le plus grand possible et en deux parties pour le rattrapage des jeux.

la quitte jamais, tandis que chacune des dents de la fraise va, après n'avoir traversé sa coupe que pendant un temps relativement très court, se rafraîchir pendant tout le reste de sa rotation au contact de l'air. Il va sans dire que, pour ces travaux de force, l'arbre porte-fraise doit être beaucoup plus solidement maintenu que dans la fraiseuse universelle dont nous venons de voir la projection (*fig.* 40). Il doit être guidé par deux ou trois portées fixées sur des traverses à montants des plus robustes. Vous en voyez des exemples remarquables sur les types de *fraiseuses-raboteuses* que je fais en ce moment passer sous vos yeux (*fig.* 45, 46, 47, 48), et dont on pourrait encore augmenter l'activité déjà cinq ou six fois plus

énergique que celle des raboteuses ordinaires du même poids.

Fig. 43.

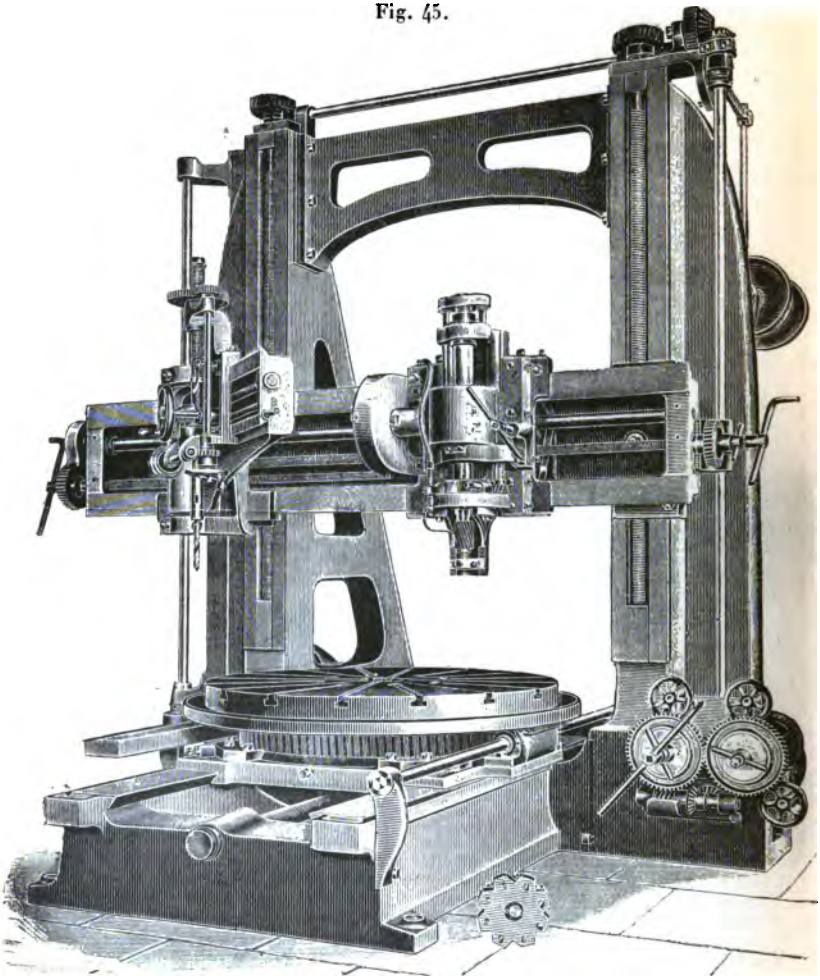


Fraiseuse parallèle horizontale et verticale *Bariquand.*

Avec cette machine, on peut exécuter tous les travaux de machines horizontales ou verticales. Elle est très employée pour l'exécution des pièces mécaniques et de l'outillage : forets, tarauds, alésoirs, engrenages droits, coniques et en hélice. L'arbre horizontal reçoit son mouvement d'un cône avec double engrenage taillé en hélice. La tête verticale est commandée par les mêmes organes et par l'intermédiaire de roues d'angle, de façon qu'elle peut prendre, dans un plan vertical, toutes les inclinaisons suivant un cercle gradué. Elle porte une contre-pointe pour soutenir le porte-fraise horizontal. Les arbres sont à collet conique avec bague conique, *trempés et rectifiés.* Les trois mouvements perpendiculaires des chariots sont réglables au centième de millimètre. Ils sont automatiques avec débrayage automatique en tout point de la course. L'avance des chariots est commandée par quatre cônes donnant huit vitesses. Le plateau porte-pièce s'incline jusqu'à 45° environ, suivant une graduation, pour fraiser les pièces en hélice avec l'arbre horizontal. Courses de la table : horizontale 850mm, verticale 350mm, transversale 300mm.

J'ai tenu à vous signaler tout particulièrement ce type de

Fig. 45.



Fraiseuse-raboteuse *Kendall* et *Gent*.

**Destinée spécialement au fraisage circulaire des brides de cylindres, jusqu'à 2m,30 de diamètre et 2m,60 de haut. Cette machine est complétée par une petite perceuse radiale pour les trous de ces brides. Table à deux mouvements : circulaire et longitudinal. Fraise montée sur une traverse de raboteuse à montants très rigides, avec avances horizontale et verticale, automatiques ou à la main.**

fraiseuse à grand débit parce que cette utilisation de la fraise

comme outil de force et de grande production, non de façon-

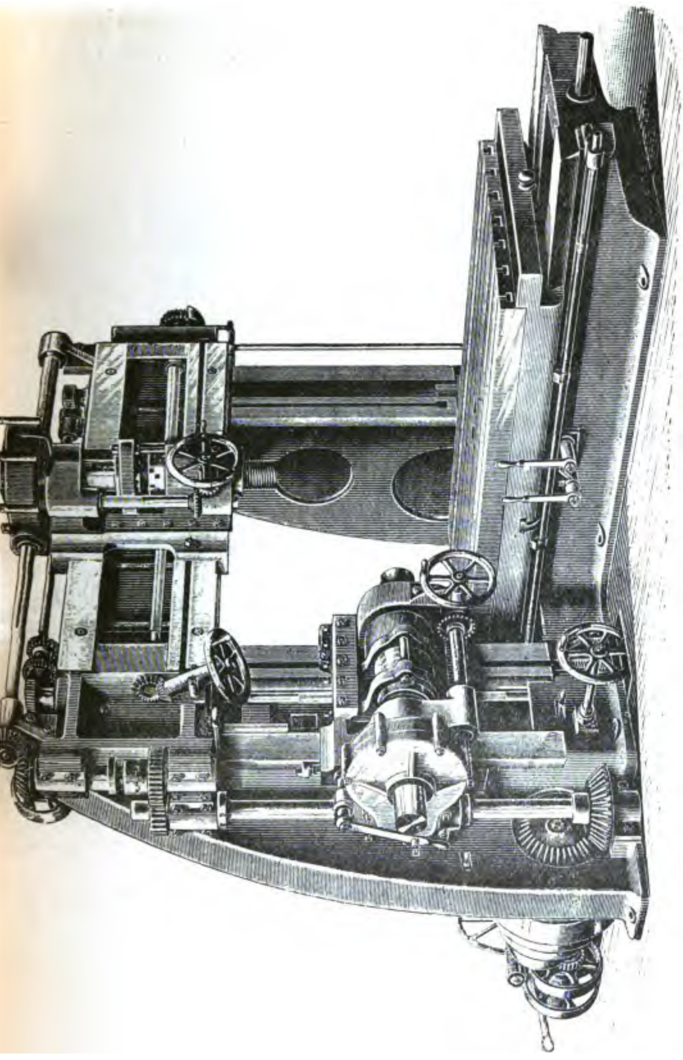


Fig. 246.

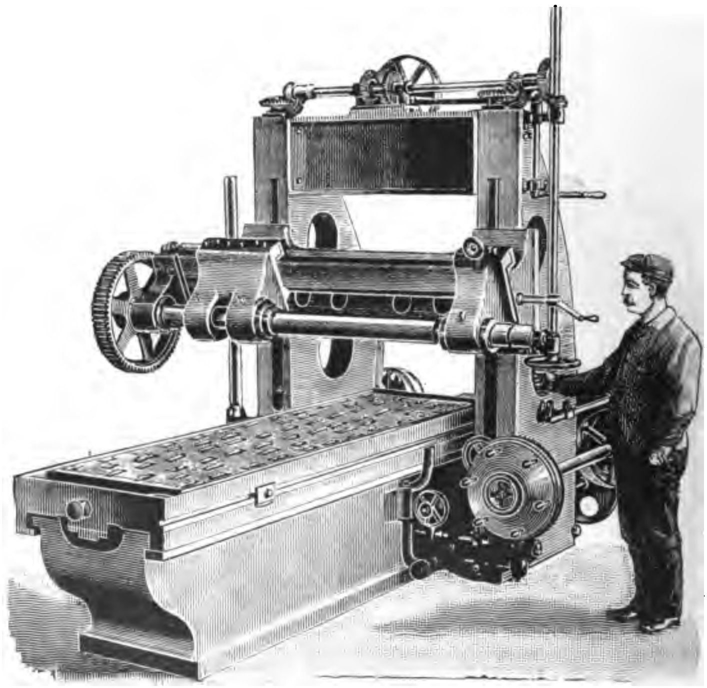
Fraiseuse-raboteuse *Richards*.

Deux broches de $200^{mm}$ de diamètre, commandées par vis sans fin avec pignons en bronze dur, pouvant recevoir des fraises de $100^{mm}$ à $500^{mm}$ de diamètre, l'une horizontale, l'autre verticale sur traverse, avec course verticale de $735^{mm}$ et course transversale de $1^m,35$, à la main ou automatique par cônes de friction, à des vitesses de $0^{mm}$ à $75^{mm}$ par minute. Table de $2^m,45 \times 1^m,20$. Course de $3^m,20$ commandée par un train à plateaux de friction, à des vitesses de $0^{mm}$ à $100^{mm}$ par minute en travail, avec commande de manipulation à la vitesse de $2^m,40$ par minute. Hauteur de la traverse au-dessus de la table $1^m,50$. On remarquera le groupement de toutes les manœuvres bien à la portée de l'ouvrier.

nage, mais de dressage ou de rabotage proprement dit, n'est pas encore pratiquée chez nous autant qu'elle devrait l'être.

Il m'est impossible, dans le peu de temps qui me reste, même de vous énumérer les nombreuses spécialisations de la fraise pour robinetterie, engrenages, boulons, aiguilles, hélices, moyeux de vélocipèdes, culasses de canons, cales, etc. Je me

Fig. 47.



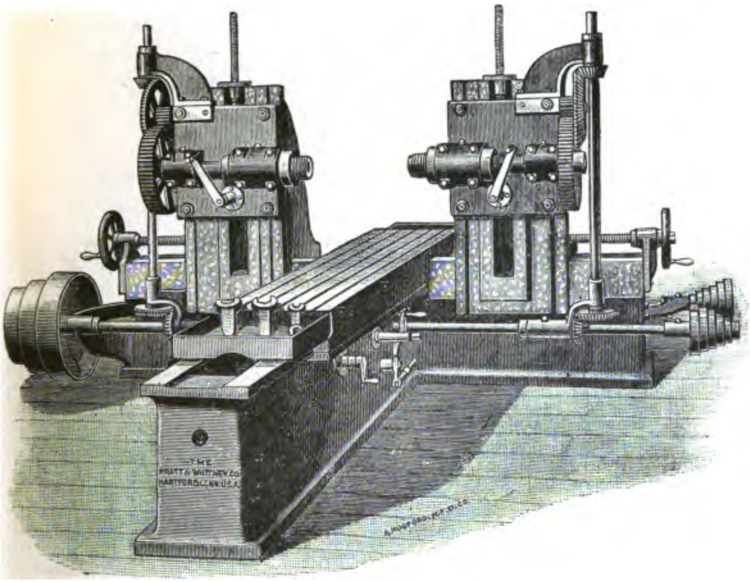
Fraiseuse-raboteuse *Ingersoil.*

Poids 9500kg. Pour rabotages de force au moyen de fraises à boutons (*fig.* 39). Peut raboter d'une passe 915mm de large sur 2m,45 de long. Avances réglées par un plateau de friction entre 20mm et 0mm,10 par seconde. Broche de 130mm de diamètre, pour fraises jusqu'à 915mm de diamètre, avec déplacement latéral de 355mm.

bornerai à faire passer sous vos yeux quelques photographies de fraiseuses-aléseuses [*fig.* 50, 51, 52 (*Pl. I*) et 53], et celles de deux machines exceptionnellement puissantes : l'une pour le fraisage en bout de grandes faces planes, l'autre pour le sciage

des plaques de blindage (1). Ces deux exemples achèveront de vous montrer combien la fraise est un outil véritablement universel, tant par l'étendue de sa puissance que par l'infinie variété des applications auxquelles elle se prête avec une souplesse absolument incomparable.

Fig. 48.



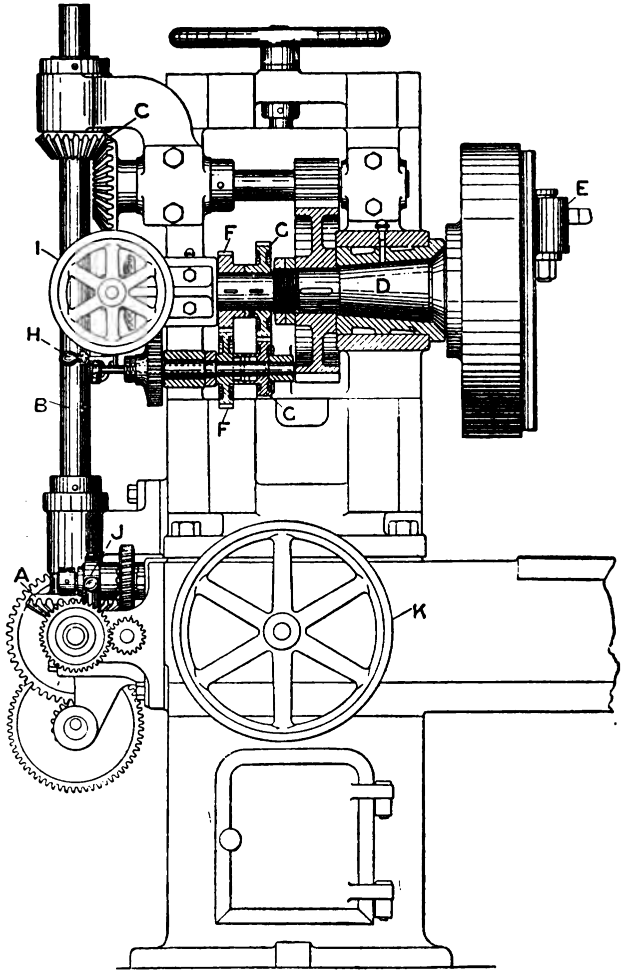
Fraiseuse-raboteuse double *Pratt-Whitney*.

Deux chariots équilibrés, avec broches porte-fraises en acier, à colliers de butée trempés et rodés; portée de $280^{mm} \times 140^{mm}$ à l'avant; écartement maximum $1^m,37$, minimum $355^{mm}$; hauteur au-dessus de la table $635^{mm}$ et $100^{mm}$. Fraises de $115^{mm}$ à $460^{mm}$ de diamètre. Table de $1^m,50$ de course sur $520^{mm}$. Poids $10500^{kg}$.

Vous remarquerez que la belle fraiseuse-aléseuse de *Sellers* est actionnée, non par une transmission mécanique ordinaire, mais par une dynamo que l'on voit installée à l'arrière du montant. Cette commande des machines-outils par des dynamos présente le grand avantage de les rendre indépendantes les unes des autres, plus mobiles, plus faciles à grouper au

(1) *Sellers* et *Craven* (*Traité des machines-outils*, t. II, p. 517 et 97).

Fig. 49.



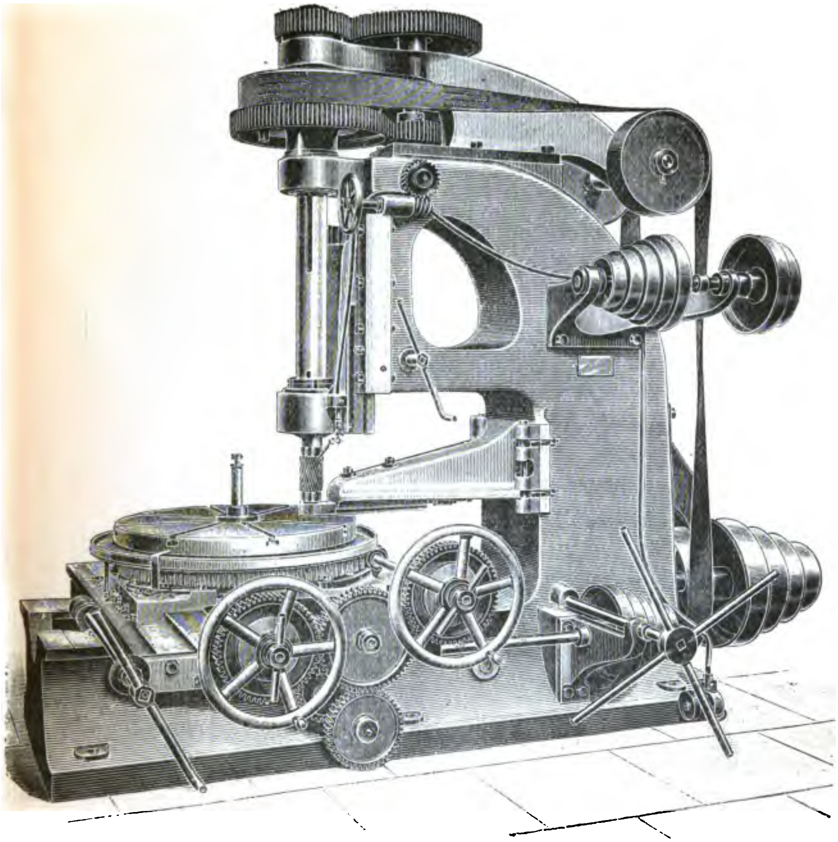

Fraiseuse par bouts *Richards*.

**D, arbre porte-outil à chariot mobile sur glissière verticale et commandé par le train ABC. E, outil monté sur vis recevant, des trains différentiels FF ou CC, suivant la position de l'embrayage H, une avance lente ou un rappel rapide. J, embrayage commandant la vis de la table. K, manette de réglage du montant.**

point voulu de l'atelier, et, en général, plus économiques,

parce que l'emploi de la dynamo permet souvent d'en simplifier les rouages et surtout de supprimer le travail perdu par

Fig. 50.



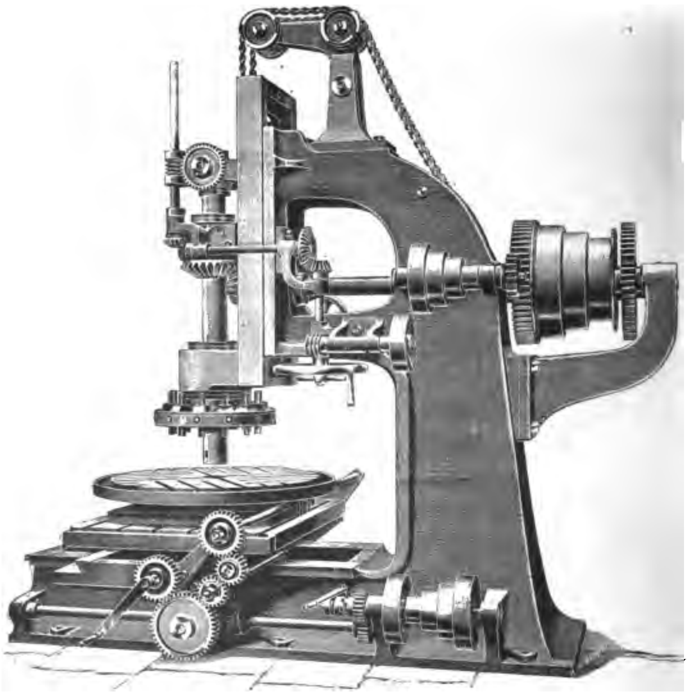
Fraiseuse-mortaiseuse façonneuse verticale *Kendall* et *Gent*.

La broche porte-fraise, de 130$^{mm}$ de diamètre, est guidée par de larges portées coniques, et la fraise est maintenue par un bras de manière à travailler sans broutement. Sa vitesse de rotation est indépendante de celle de l'avance de la table, de sorte qu'on peut la proportionner aux diamètres des fraises sans changer cette avance. Table à trois mouvements : circulaire, longitudinal et transversal, automatiques ou à la main, pouvant facilement s'adapter au façonnage par *gabarit*, d'après la méthode de *M. Desgrandchamps*.

la marche incessante des transmissions, qui s'élève parfois à

50 et 60 pour 100 de la puissance totale du moteur. Avec la commande électrique, au contraire, chaque machine-outil ne

Fig. 51.

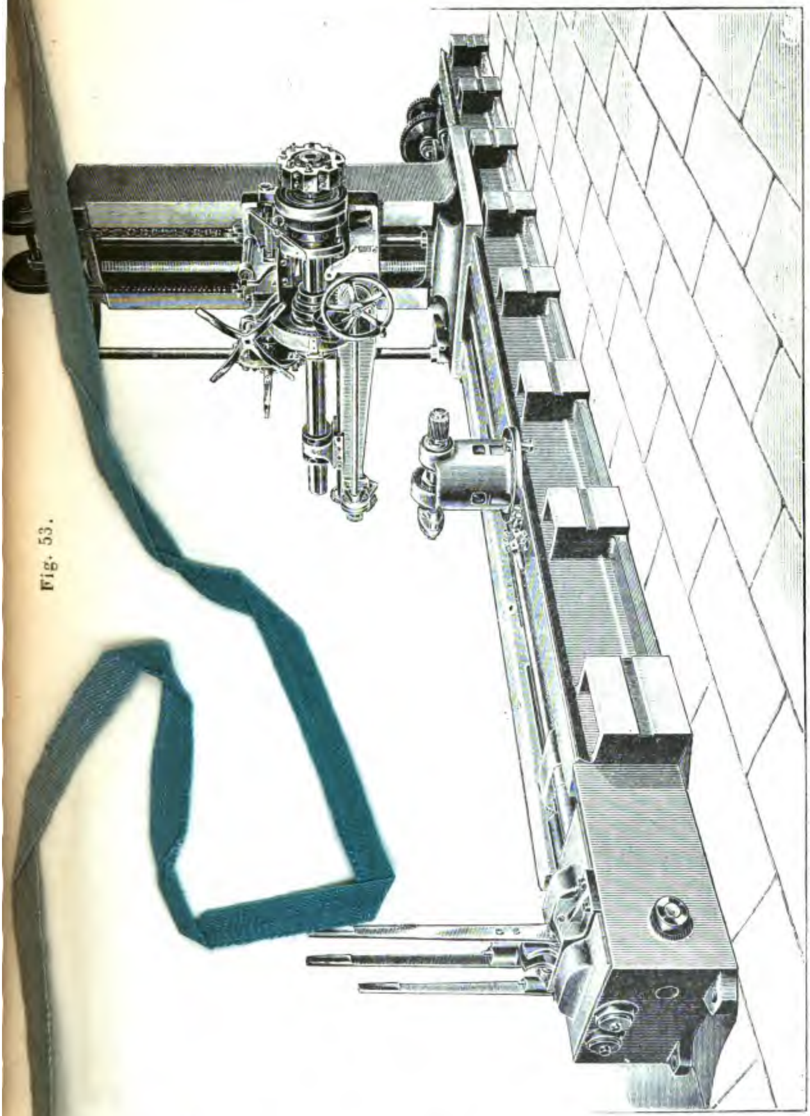


Fraiseuse-perceuse et aléseuse *Asquith*.

Broche de 125mm de diamètre, à coussinets coniques, équilibrée, avec butée sur grains d'acier pouvant recevoir soit une fraise, soit un foret, soit une aléseuse. Table de 1m,20 × 1m,05, à courses orthogonales automatiques ou à la main de 1m,05, avec plateau circulaire de 1m,05 commandé par une vis tangente. Étudiée principalement pour les façonnage, perçage, alésage et fraisage des manivelles.

dépense que proportionnellement à son travail effectif, et sa faculté de se déplacer à volonté, de fonctionner également bien à toute distance du moteur, procure non seulement de grandes facilités, mais aussi des économies de manœuvre et de transport, toutes les fois qu'il est, comme dans beaucoup

Fig. 53.



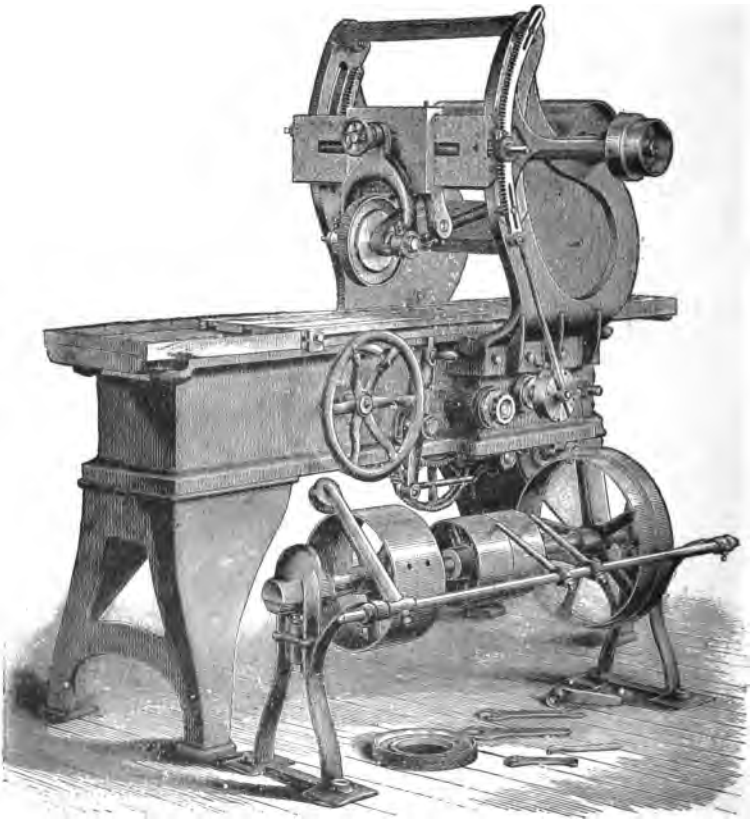
Fraiseuse-aléseuse *Kendall* et *Gent*.

**Grande fraise frontale, montée sur un bâti vertical, à course horizontale de 9m; course verticale 3m, diamètre de la broche aléseuse-fraiseuse 150mm. On peut monter sur le chariot de la broche le porte-fraise à base circulaire représenté détaché sur le banc, et qui permet de fraiser dans toutes les directions.**

de chantiers, plus avantageux de déplacer la machine-outil que l'objet travaillé par elle.

Je terminerai cette course rapide à travers le domaine des machines-outils par quelques mots sur la *meule*. Il ne s'agit

Fig. 54.



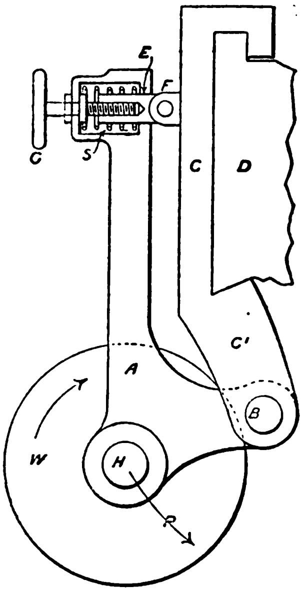
Dresseuse *Brown* et *Sharpe*.

Peut meuler des pièces de 915$^{mm}$ × 355$^{mm}$ × 292$^{mm}$ de haut. Le chariot de la meule, de hauteur réglable à volonté, reçoit sur sa traverse un mouvement transversal automatique dans chaque sens, puis son avance à la fin de chaque course transversale. Le mouvement de la table est automatique, à course réglable par des butoirs.

pas ici de la meule ordinaire en grès, dont l'usage, très limité d'ailleurs, est connu de tous et pratiqué de temps immémorial, mais de la meule en *émeri* ou en carborendum, qui peut,

comme la fraise, prendre toutes les formes, se r
machines les plus variées et s'adapter ainsi au
plus divers de dressage, d'affûtage et de polissag
56). Ces meules peuvent, en effet, être considér
concerne la nature même de leur travail, comı

Fig. 55.



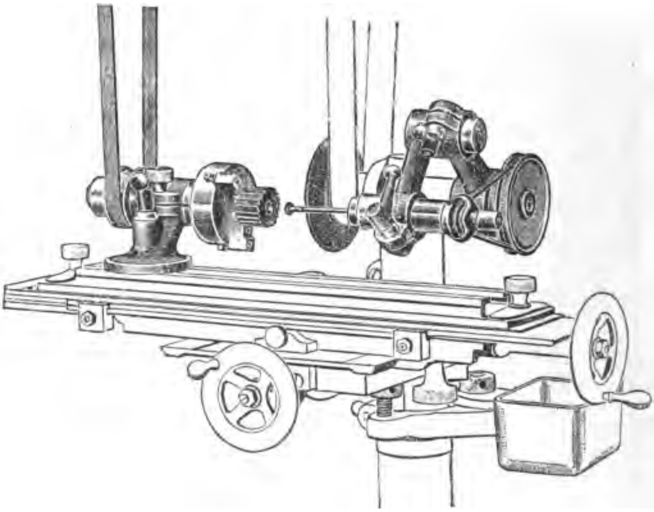

Dresseuse *Brown* et *Sharpe*.

Détail du réglage de la meule : D, traverse ; CC', glissière
meule A, pivoté en B et réglé par la vis G, filetée dans l'étrier
S, ressort appuyant A sur le collet de G ; W, meule ; P, arc dé
la meule autour de B, quand on la règle par G.

constituées par une infinité de dents très petit
maintenues par un agglomérant ou ciment, dont l
et la bonne fabrication sont absolument essenti
de vue de la durée et de la solidité de la meule.
de ces dents fait qu'elles ne peuvent pas enleve
comme la fraise, ce qui limite l'emploi de la me
vaux tout superficiels, mais leur dureté leur pe

de leur conserver, pour chaque travail, des formes rigoureusement identiques aux types déterminés par expérience comme les meilleurs dans chaque cas. Cette importante opération de la taille des outils, trop souvent négligée, cesse ainsi, au grand

Fig. 58.



Affûteur *Walker*. — Alésage d'une fraise.

Broche de $6^{mm}$ de diamètre sur $250^{mm}$ de long. Vitesse, 20,000 tours par minute, avec graissage au pétrole.

bénéfice de l'économie et de la bonne exécution du travail, d'être abandonnée au sentiment de l'affûteur, c'est-à-dire à peu près au hasard ([1]).

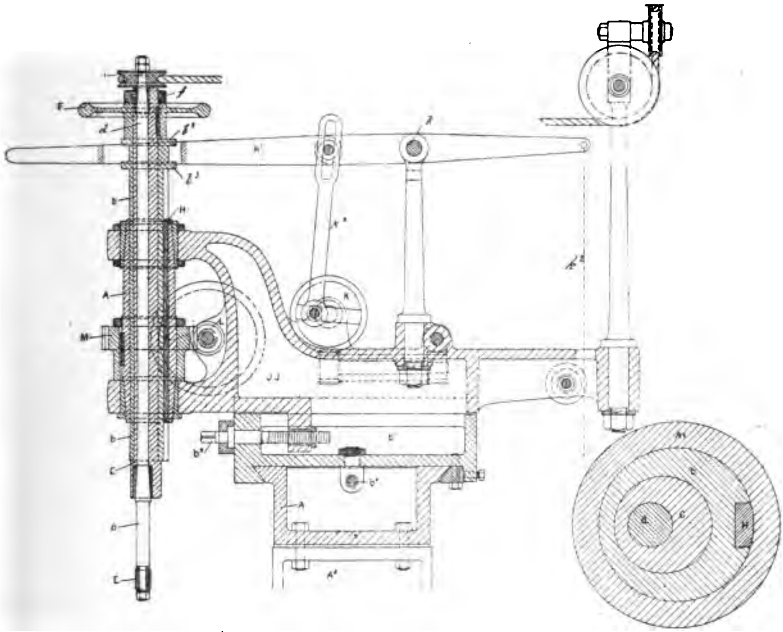
Cette même opération des dents de la meule en fait un excellent outil de polissage et de dressage pour les pièces trempées ou coulées en coquille, comme les jantes des roues en fonte employées sur les chemins de fer américains.

C'est aussi à l'aide de la meule, dont l'action extrêmement douce ne fléchit pas les pièces en travail, et des machines

([1]) Machines de *Sellers* et de *Conradson* (*Traité des machines-outils*, t. II, p. 320 et 329).

**dites** à rectifier (*fig.* 62) que l'on finit avec une précision absolue, impossible à atteindre autrement, les axes tournés après leur trempe, et que l'on réalise, par un procédé très simple,

Fig. 59.



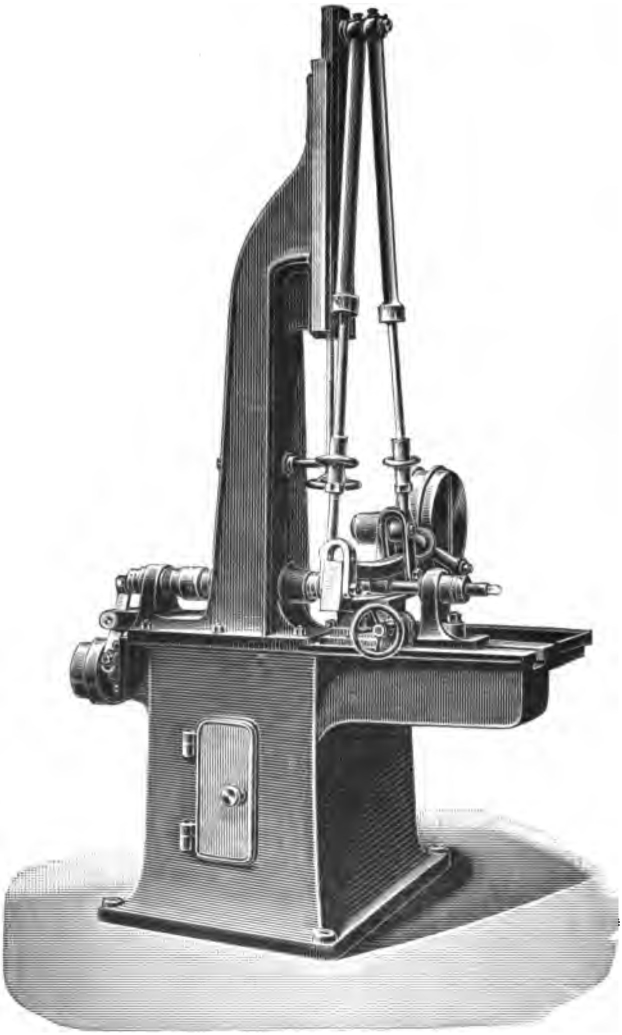
Meule aléseuse *Peacock*.

Ensemble du montage et détail de la broche excentrée : E, meule, dont l'arbre *d*, commandé par *i*, est excentré dans la tige *c* du manchon *b*, rainuré en H dans la douille A du pignon M, commandé par la vis sans fin L. K K² K' *k*, mécanisme imprimant, par $b^2 b^3$, un mouvement vertical alternatif au manchon *b*. $k^2$, corde permettant de manœuvrer K' à la main. *b'*, vis commandant la translation du chariot JJ de A sur le banc A'.

des arbres parfaitement calibrés, droits et pratiquement indéformables.

Je pourrais prolonger longtemps encore cette revue rapide des principales machines-outils : les *taraudeuses*, le *petit outillage*, les *jauges*, les *calibres*, etc., dont je n'ai pu qu'à peine vous indiquer le rôle si important, puis l'outillage de la

Fig. 60.

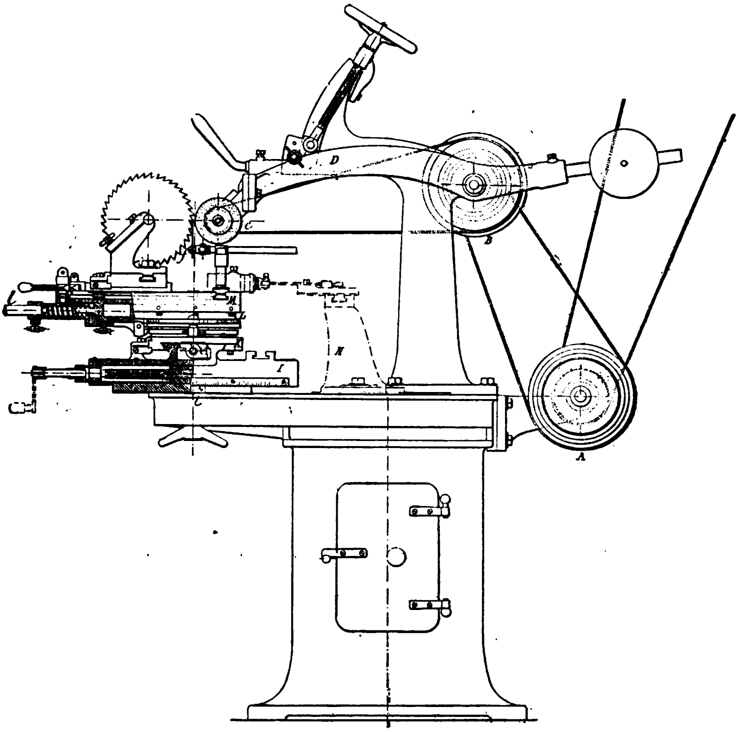


Machine *Fétu* et *Defize* à meuler les coulisses de distribution.

*chaudronnerie* et de la *forge* : cisailles, poinçonneuses, riveuses, emboutisseuses, marteaux, presses à forger, etc., dont

la monographie n'a jamais été faite... mais j'ai déjà dépassé le temps auquel je pouvais légitimement prétendre; il ne me reste plus qu'à vous demander quelques moments encore

Fig. 61.

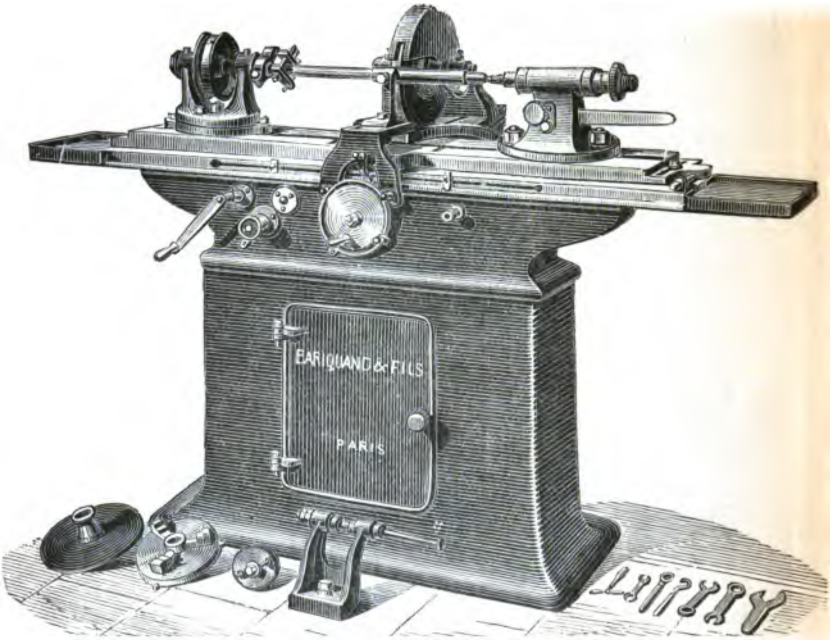


Machine à affûter les fraises, de M. *Kreutzberger.*

c, meule commandée par la transmission AB, portée par un bras D, avec vis permettant d'en régler la hauteur. I, grand chariot, pivoté sur l'axe *i*, portant un second chariot K, orthogonal au premier plateau L, supportant le chariot M du porte-fraise constamment appuyé par un ressort sur le gabarit N. Cette machine permet d'affûter très exactement des fraises d'un profil quelconque; elle est la résultante d'une longue série de travaux, par lesquels M. Kreutzberger a si brillamment contribué aux progrès des fraiseuses.

pour chercher à dégager de ces quelques exemples, qui viennent de passer si rapidement devant vous, les tendances générales de la machine-outil moderne.

Fig. 62.




Machine à rectifier *Bariquand.*

Cette machine est spécialement destinée au travail à la meule des pièces en acier trempé et à la rectification des pièces cylindriques, coniques ou à faces planes. Tous les arbres des poupées sont à collets *trempés et rectifiés.* Leurs coussinets sont formés de bagues extensibles protégées contre la poussière d'émeri par leurs écrous de réglage à chapeau. La *table* marche à la main ou automatiquement dans les deux sens. Le changement de marche se fait automatiquement au moyen de butées réglables. La *poupée fixe* est montée sur base pivotante graduée pour la façon des pièces coniques. Elle reçoit un *plateau centrant seul*, une *poulie folle à toc* pour le travail des pièces entre pointes fixes. La poupée fixe est, en outre, disposée pour recevoir une roue diviseur avec alidade pour l'usinage des pièces divisées. La *contre-pointe à ressort* donne une pression constante sur les pièces. Elle peut être immobilisée par une vis de pression. Ces deux poupées sont fixées sur la *coulisse pivotante* qui sert à incliner la ligne des pointes par rapport à l'axe de la table pour la production des cônes. Une des extrémités de cette coulisse porte une graduation et une vis de rappel. La *poupée porte-meule* est recouverte d'une garde. Pour la rectification des surfaces intérieures, on remplace la poupée précédente par une *petite poupée à longue broche*. La *coulisse transversale* est mue à la main par un volant placé sur le devant de la machine. Sa partie supérieure reçoit les poupées porte-meules. Elle pivote pour donner la coupe. Un pont en fonte porte-lunette à suivre et guide réglable se fixe sur le bâti au-dessus de la table. Hauteur des pointes 160$^{mm}$, longueur entre pointes 780$^{mm}$.

On cherche, bien entendu, à rendre le travail des machines-

outils le plus précis, le plus économique et le plus rapide possible. Nous avons vu par quels moyens on s'assurait la précision. La rapidité s'obtient en rendant la fabrication aussi automatique et suivie que possible, et ce, au moyen d'outils dont la puissance s'exerce avec la plus grande intensité, la plus grande continuité possibles. Le tour, la fraise, la presse à forger tiennent, à cet égard, le premier rang et, fort heureusement, aussi comme précision et sûreté. L'économie s'obtient d'abord, comme nous l'avons vu, par la précision même, la rapidité du travail et la bonne organisation de l'atelier, qui permet souvent de confier à un seul ouvrier la surveillance de plusieurs machines (six alésoirs pour un seul ouvrier aux ateliers du Midland R^y^) et réduit au minimum les frais de transport et de manipulation des pièces. L'économie s'obtient aussi par la *spécialisation du travail,* qui entraîne à la fois celle des machines-outils les mieux adaptées à ce travail et celle non moins importante des études. Il est, en effet, bien évident qu'un industriel adonné à une ou deux fabrications spéciales sera sans peine mieux au courant que personne des progrès de ces fabrications, par son expérience personnelle constamment développée dans le même sens, parce qu'il lui sera aisé de suivre exactement et au jour le jour la littérature forcément limitée qui l'intéresse, et aussi parce que la renommée acquise dans ses spécialités fera que les inventeurs qui s'en occupent s'adresseront à lui de préférence pour lui soumettre leurs projets. De là, ce fait, presque universel aujourd'hui, que toute fabrication susceptible d'alimenter un atelier même de moyenne importance : machines à coudre, moteurs à gaz, machines frigorifiques... ne tarde pas à devenir l'objet d'une entreprise spéciale, entraînant comme conséquence la spécialisation même des machines-outils qu'elle utilise. Ce développement presque indéfini de la machine-outil par différentiations d'une extrême variété constitue l'un des éléments les plus puissants et les plus actifs de son progrès.

Nulle part cette spécialisation ne s'est organisée d'une façon plus grandiose et plus variée qu'aux États-Unis, et nulle part aussi la machine-outil, celle de moyenne et de petite

importance surtout, n'y a fait de progrès plus rapides et plus remarquables. Je sais fort bien qu'il y a, pour expliquer ce prodigieux développement de la Mécanique américaine, bien des raisons d'ordres économique, politique et social, mais il en est aussi de purement techniques, entre autres la spécialisation de l'outillage très bien fait et admirablement adapté à ses fonctions, l'organisation simple et pratique des ateliers, puis enfin l'esprit entreprenant et véritablement industriel des constructeurs américains, qui n'hésitent presque jamais devant le sacrifice immédiat à faire pour améliorer ou étendre une fabrication, au lieu de songer à se retirer bien vite après avoir fait une petite fortune. Il en résulte que l'on arrive, dans les grands ateliers américains, à fabriquer à des prix de revient presque toujours inférieurs aux nôtres avec une main-d'œuvre beaucoup plus chère que chez nous et des prix de matières équivalents. Ce sont là, Messieurs, des qualités qu'il faut savoir reconnaître à nos rivaux : il n'y a rien d'humiliant à constater une supériorité peut-être momentanée, due, en grande partie, à des circonstances exceptionnellement favorables, mais il serait impardonnable de nier l'évidence et de ne point profiter des leçons que nous donne le succès même de cette grande nation, dont les ingénieurs sont, d'ailleurs, les premiers à reconnaître, comme ils l'ont fait à propos de l'exposition française à Chicago, que, quand nous le voulons, nous pouvons faire aussi bien, sinon mieux, que les plus habiles d'entre eux [1].

---

[1] G. RICHARD, *La Mécanique générale à l'Exposition de Chicago*, Préface, p. 4.

# RECHERCHES

## SUR LES INSTRUMENTS, LES MÉTHODES ET LE DESSIN TOPOGRAPHIQUES,

Par le Colonel A. LAUSSEDAT.

### CHAPITRE I (*Suite*).

### APERÇU HISTORIQUE SUR LES INSTRUMENTS ET LES MÉTHODES.

IV. — *Période comprenant le moyen âge et les premiers temps de la Renaissance. Sur les instruments des navigateurs et des géographes de cette époque.*

Ceux qui ont le plus profité des travaux et des traditions des Arabes ont été naturellement leurs voisins de la péninsule ibérique et, même auparavant, les Italiens devenus de grands voyageurs et de grands négociants sans cesse en relations avec le Levant, c'est-à-dire avec eux et avec les Grecs dépositaires de la science de leurs ancêtres, mais déjà bien dégénérés. Nous avons vu que les *Francs* connaissaient la boussole au moins depuis la fin du XII^e siècle, et il est également certain que les peuples germaniques, les Anglo-Saxons, les Bataves, qui avaient pris part aux croisades et, plus au nord, les Scandinaves en faisaient usage à la même époque. Il est bien probable, d'un autre côté, que, toujours et surtout à l'occasion

et à la suite des croisades, les longs voyages par terre, très fréquents aussi, entrepris par les pèlerins, les hommes d'armes, les trafiquants, obligèrent les guides dont ils se servaient à s'orienter de mieux en mieux à travers des pays souvent incultes, inhabités, couverts de forêts, dépourvus de routes et aussi difficiles à parcourir que la Méditerranée elle-même, sans crainte de s'égarer (1).

Les premières notions d'Astronomie ou plutôt de Cosmographie acquises traditionnellement, souvent même instinctivement, par les navigateurs, et qu'ils avaient transmises aux autres voyageurs, les mettaient les uns et les autres en état de déterminer à peu près la latitude du lieu où ils se trouvaient, en mer ou à terre. Mais la longitude était beaucoup plus malaisée à obtenir ; aussi s'en est-on passé pendant longtemps et les navigateurs comme les voyageurs ont-ils dû, pour se retrouver comme pour se guider, se contenter d'évaluer les distances itinéraires successivement parcourues dans les directions indiquées par les astres ou par la boussole et rapportées sur des cartes rudimentaires appelées *Portulans* par les marins.

Pour trouver la latitude, on avait recours, comme aujourd'hui, à la mesure de la hauteur méridienne du Soleil ou d'une étoile bien connue, et c'était l'un des principaux usages de l'astrolabe. Quant à l'évaluation des distances itinéraires, elle était le plus souvent fondée sur l'observation du temps employé à les parcourir, et indirectement en mer sur des expériences temporaires faites à l'aide de sabliers et de corps flottants dont on jugeait l'éloignement *à l'estime,* et qui, perfectionnées et régularisées, ont conduit à l'invention du *loch* (2).

---

(1) Les Arabes employaient ainsi depuis longtemps des cartes auxquelles on pourrait sans doute comparer celles que l'on connaît pour les pèlerinages à travers l'Europe centrale. Barthema dit, en effet, que les voyageurs, en Arabie, se servaient de la *Carte géographique* et de la *boussole,* et il appelle *pilote* celui qui dirigeait les caravanes. [RAMUSIO, *Viaggi,* t. I, f. 150 (cité par Libri)].

(2) Cette invention date du XVIe siècle. Les Anglais se servaient du loch depuis 1570, tandis que les Français l'adoptèrent seulement en 1630. Il est intéressant, à ce sujet, de constater que les sabliers, dont l'origine est si ancienne, n'ont pas cessé d'être en usage dans la Marine.

La détermination de l'heure locale, à des intervalles plus ou moins longs, s'imposait donc; d'où, indépendamment des clepsydres, des sabliers et des horloges mécaniques, ces dernières peu répandues d'ailleurs, l'usage si fréquent des cadrans solaires portatifs, appelés en latin *penciles,* dont nous avons vu que les Arabes avaient imaginé un grand nombre. Ils avaient aussi très ingénieusement approprié l'emploi de l'astrolabe à la solution de ce problème de la détermination de l'heure et, encore une fois, ce furent les Italiens, les Espagnols et les Portugais qui, plus immédiatement en contact avec eux au xv[e] siècle, purent aussitôt tirer le parti le plus avantageux de ces diverses ressources ; mais il ne paraît pas qu'ils aient sensiblement amélioré la construction d'instruments dont ils ont tout d'abord fait les mêmes usages que leurs initiateurs.

Il est donc au moins surprenant de trouver chez d'anciens historiens, et même chez quelques commentateurs plus modernes, l'opinion que l'usage de l'astrolabe dans la navigation aurait été, pour ainsi dire, suggéré vers 1484 par le célèbre navigateur et cartographe Martin Behaim, associé à deux savants médecins et mathématiciens portugais, Rodrigue et Joseph, de la cour du roi Jean II.

Voici le texte de l'un des auteurs de cette tradition erronée qui, au fond, n'était peut-être qu'une courtisanerie à l'adresse de Jean II :

« Ut minore cum errandi periculo ignotum mare navigari posset, Roderico et Josepho, medicis suis, nec non Martino Bohemo, ea ætate peritissimis mathematicis, injunxit Joannes II, ut adhibito inter se consilio, excogitarent aliquid, quo nautæ cursum navium, licet in nostro novoque pelago, tutius dirigerent, ut vel abstracti a notis sideribus, cognitisque litoribus, quam cœli et pelagi partem tenerent, aliquo modo cognoscerent : *ii post indefessum studium, longamque meditationem astrolabium, instrumentum quod ante astronomiæ tantum inserviebat, utiliori invento ad navigandi artem, maximo navigantium commodo, transtulere; quod beneficium tota Europa Joanni debere, inficiari non potest.* » — Emman. Tellesius Sylvius, Marchio Alegretensis, de rebus

gestis Joannis II, Lusitanorum regis (Hagæ Com., 1712), cité par Ch. Amoretti dans sa Notice sur Martin Behaim.

Or, il est avéré que le Génois Andalone del Nero, qui professa l'Astronomie à Florence, est l'auteur d'un *Traité de l'Astrolabe* imprimé à Ferrare en 1475, qu'il avait fait usage de cet instrument dans de longs voyages et utilisé ses observations pour corriger d'anciennes cartes géographiques, *rendant ainsi un service éminent à la géographie et à la navigation*. (Libri, tome II, p. 202).

Mais comment pourrait-on douter d'ailleurs que les Arabes, qui ont tant perfectionné les quadrants, les astrolabes, les montres solaires, et jusqu'aux horloges mécaniques, ne se soient pas avisés de les utiliser dans leurs immenses voyages d'exploration par terre et par mer. Cela est absolument inadmissible et il suffirait, pour le prouver, de rappeler l'étonnement de Vasco de Gama lorsque, après avoir doublé le cap des Tempêtes, en 1498, il entra, pour se diriger vers l'Inde, dans l'océan Oriental et y trouva que « les pilotes de ces mers se servaient très habilement et des *cartes marines* et de l'*aiguille aimantée*, et prenaient les hauteurs de l'équateur avec un *quart de cercle* ou un *astrolabe*, pour savoir où ils étaient [1]. »

Or, les pilotes de ces mers étaient sûrement des Arabes [2] et ne faisaient que suivre des traditions déjà séculaires.

Toutefois, il convient de reconnaître que les navigateurs européens de la fin du xv^e et du commencement du xvi^e siècle perfectionnèrent à leur tour, sinon les instruments, au moins les méthodes d'observation et ne tardèrent pas à se préoccuper, notamment, du problème des longitudes plus qu'on ne l'avait fait jusqu'alors.

Ce problème devenait, en effet, indispensable à résoudre, à

[1] Klaproth, *Lettre à M. le baron de Humboldt sur l'invention de la boussole*, p. 63.

[2] Les Indiens n'ont jamais été de grands navigateurs, et la connaissance de la boussole (qui a tant aidé les Arabes) ne paraît s'être introduite que fort tard chez eux (Klaproth, p. 31). Ils se servaient de clepsydres pour la mesure du temps, connaissaient la sphère armillaire, le cercle de déclinaison, le *niveau à bulle d'air* (*sic*), et des gnomons auxquels ils adaptaient des tubes pour observer les étoiles. (*Asiatic researches*, t. V et IX, cité par Libri.)

mesure que les relations s'établissaient entre l'Europe, devenue le centre de l'activité intellectuelle et commerciale, et les pays éloignés que l'on désignait sous les noms d'Indes orientales et d'Indes occidentales, à mesure aussi que se multipliaient les voyages d'exploration ([1]).

Si les découvertes des Italiens — les Toscans avaient été les premiers à retrouver les Canaries, — celles des Portugais, qui ont eu autant de ténacité que d'initiative, et de quelques aventuriers d'autres pays le long des côtes d'Afrique et dans les archipels peu éloignés, comme ceux des Açores et du Cap Vert, avaient pu être tentées et accomplies sans le secours d'instruments soignés et d'observations délicates, il n'en avait plus été de même quand les navigateurs, devenus de plus en plus hardis, s'avancèrent à de grandes distances sur les océans.

C'était déjà grâce à l'astrolabe et à la boussole que Christophe Colomb et Vasco de Gama avaient pu réaliser leurs merveilleux projets; mais en perfectionnant ces instruments, et surtout l'astrolabe, les savants et les constructeurs hollandais que nous allons maintenant rencontrer ont servi à la fois leur pays, dont les navires suivirent de si près ceux des Espagnols et des Portugais dans les mers lointaines, la science de la Navigation et préparé les progrès de la Géodésie et de la Topographie.

Nous arrivons ainsi à l'époque de ces perfectionnements qui font l'objet principal de nos recherches; mais, au risque d'être accusé de nous en écarter de nouveau, nous dirons encore que, dès les premières années du XVI<sup>e</sup> siècle, l'un des compagnons de Magellan, le chevalier Pigafetta, écrivait un *Traité de Navigation* dans lequel il donnait trois méthodes pour trouver la longitude d'un lieu, méthodes que Magellan avait sans doute employées avec plus ou moins de succès ([2]), notamment celle des distances lunaires, dont les astronomes

---

([1]) Une circonstance tout à fait décisive doit être signalée à propos du problème des longitudes, celle de l'obligation où se trouvaient les Espagnols et les Portugais de déterminer exactement le méridien de 180° qui, en vertu de la bulle du pape Alexandre VI, divisait leurs possessions.

([2]) Ces trois méthodes sont probablement celles qu'au rapport de Castagnedo, Faleiro avait enseignées à Magellan. (Note de l'extrait du *Traité de Navigation* de PIGAFETTA, par Ch. AMORETTI.)

ou, comme on disait alors, les cosmographes italiens et allemands s'occupaient dans le même temps [1].

## V. — *Les instruments des topographes identiques avec ceux des autres voyageurs.*

Les premiers levers topographiques un peu détaillés qui remontent à l'époque de transition assez obscure dont nous nous occupons ont fatalement été entrepris par des voyageurs et exécutés avec les mêmes instruments qui leur servaient à relever leurs itinéraires. Il n'était guère question de cadastre alors, et les arpenteurs exercés ne devaient reparaître que bien plus tard. Toutefois, la chaîne et l'équerre ne disparurent jamais et on les trouve entre les mains des constructeurs et des architectes de tous les âges, mais le besoin d'évaluer les distances et les hauteurs de points plus ou moins éloignés, qui s'est toujours fait sentir à ceux qui voyagent et aux hommes de guerre en particulier, exigeait l'emploi de procédés géométriques indirects et, par conséquent, d'instruments propres à la mesure des angles, c'est-à-dire de ceux précisément dont se servaient les astronomes et les marins.

En essayant de représenter les pays qu'ils parcouraient, d'en dresser la carte plus ou moins détaillée, les voyageurs et les ingénieurs militaires, nécessairement topographes, n'eurent donc rien de mieux à faire que de profiter de ces instruments [2].

Le premier et le plus important que l'on rencontre, c'est encore l'astrolabe ; peut-être ne l'a-t-on pas assez remarqué,

---

[1] *Premier voyage autour du monde par le chevalier Pigafetta sur l'escadre de Magellan, pendant les années* 1519, 1520, 1521 *et* 1522, suivi de l'extrait du *Traité de Navigation* du même auteur, traduits par Ch. AMORETTI. Paris, l'an IX. « Les pilotes d'aujourd'hui, disait Pigafetta, au commencement du Chapitre des longitudes, se contentent de connaître la latitude; ils sont d'ailleurs si orgueilleux qu'ils ne veulent pas entendre parler de la longitude. » L'orgueil de ces braves gens venait sans doute très simplement de ce qu'ils ne voulaient pas avouer leur ignorance.

[2] Au x<sup></sup>e siècle, c'était de l'astrolabe et d'une sorte de gnomon appelé *horoscope* que Gerbert se servait pour résoudre sur le terrain, devant ses nombreux disciples, les problèmes ordinaires de la Géométrie pratique.

car le nombre des Ouvrages publiés dans tous les pays de l'Europe, du XVI[e] au XVIII[e] siècle, à son sujet et dans lesquels il est décrit comme pouvant servir non seulement aux observations astronomiques et nautiques, mais aux opérations à effectuer sur le terrain, est prodigieux, et il serait à peu près impossible d'en donner une bibliographie qui resterait toujours incomplète. L'instrument qui s'y trouve désigné uniformément sous le nom d'astrolabe était d'ailleurs de construction plus ou moins simple, mais toujours essentiellement composé d'un cercle divisé suspendu à un anneau et d'une alidade diamétrale mobile.

Nous mentionnerons à part les deux astrolabes relativement modernes, puisqu'ils sont tous les deux du XVI[e] siècle, qualifiés très expressivement d'*universels*, celui de Gemma Frisius (¹) et celui de Rojas. Sur la face ou sur le dos de ces instruments on trouve, pour le premier, une projection stéréographique de la sphère (²), non plus sur un horizon à une latitude déterminée, mais sur un méridien, et, pour le second, une projection orthographique toujours accompagnées, l'une et l'autre, d'une règle-alidade centrale aidant à résoudre les principaux problèmes uranographiques ou nautiques, et nous allons retrouver bientôt ces instruments munis d'une aiguille aimantée et formellement destinés à mesurer les azimuts aussi bien que les hauteurs.

---

(¹) Gemma Frisius, né à Dockum (Frise) en 1508, mort en 1555, fut un savant distingué et un très habile constructeur dont les instruments méritent une mention spéciale pour le soin avec lequel ils étaient exécutés et pour l'influence qu'ils ont eue sur le perfectionnement d'un art si utile lui-même aux progrès de la Science. Gemma Frisius, reçu docteur en 1541, professait la Médecine à l'Université de Louvain, mais il avait une prédilection marquée pour les Mathématiques et l'Astronomie; homme d'études, il avait refusé d'être attaché à la cour de Charles-Quint. Son Ouvrage a pour titre : *De Astrolabio catholico et usu ejusdem* (Anvers, 1556). Son neveu, Gualterius Arsenius, lui avait succédé comme constructeur; le Conservatoire des Arts et Métiers possède deux des astrolabes de ce dernier, avec aiguille aimantée, auxquels il est fait allusion dans le texte et dont l'un est représenté ci-après (*fig.* 17).

(²) L'expression de *projection stéréographique* n'a été introduite que plus tard par le savant jésuite Aguillon (voyez *Optica* AGUILONII, Antverpiœ, M.DC.XIII). Si nous l'avons déjà employée, c'est parce qu'elle est généralement adoptée depuis lors et que celle de *planisphère* donnait lieu à confusion.

L'astrolabe n'était cependant pas le seul instrument auquel eussent recours les topographes qui cherchèrent aussi à se servir de ceux qui avaient été remis en honneur ou imaginés par les restaurateurs de l'Astronomie en Allemagne. C'est ce qui résulte de l'étude de la littérature scientifique des premiers temps de la Renaissance.

Parmi les nombreux Ouvrages dont j'ai jugé inutile de donner même la liste, j'en ai cependant choisi un, celui de Gio Paolo Galucci Salodiano, Academico Veneto, de la fin du XVIe siècle (1), parce qu'il peut être considéré, en effet, comme résumant la plupart de ceux qui l'ont précédé, qu'il contient les renseignements les plus détaillés sur presque tous les instruments en usage à cette époque et que l'on n'y a ajouté que peu de chose dans ceux qui l'ont suivi pendant près d'un siècle.

On y voit, notamment, que l'astrolabe disposé horizontalement était employé déjà pour faire de véritables triangulations, et la figure qui accompagne le texte en cet endroit est la même dont on se sert encore aujourd'hui pour expliquer la *Méthode des intersections* (*Dell' uso dell' Astrolabio*, Lib. quatro, Cap. XI. *Come si posso con l'Astrolabio mettere una provincia in disegno*); on y voit également que l'une des parties de l'instrument, celle que nous connaissons sous le nom de *quarré des ombres*, servait à mesurer les distances, les hauteurs et les profondeurs par les méthodes bien connues, toujours les mêmes dans tous les auteurs et qui sont passées en revue dans l'Ouvrage de Galucci, Lib. quatro, Cap. II à Cap. X.

On trouve enfin dans ce même Ouvrage la description et l'usage du *triquetrum* de Ptolémée, de l'*arbalestrille* (2) de

---

(1) Cet Ouvrage a pour titre : *Della fabrica et uso de diversi stromenti di astronomia et cosmografia ove si vede la somma della teorica et pratica di queste nobilissime scienze*. In Venetia, appresso Ruberto Meietti. CIↃ.IↃ.XCVIII (1598).

(2) Cet instrument a porté beaucoup d'autres noms, par exemple ceux de *bâton de Jacob, crosse de Saint-Jacques, rayon astronomique, baliste, croix géométrique*, etc.

Le premier, celui de *bâton de Jacob*, lui viendrait, paraît-il, de son inventeur, Lévi ben Gerson, israélite, né en Catalogne. On a cru pendant longtemps que Regiomontanus et Martin Behaim avaient été les premiers à se

Lévi ben Gerson et du *quarré géométrique* de Purbach et de Regiomontanus (*geometrische Quadrat*), qui n'est d'ailleurs autre chose, au fond, que le quarré des ombres pris isolément ou le quadrant (quart de cercle) des Arabes (1).

---

servir de cet ingénieux appareil qui permet de *viser à la fois dans deux directions différentes,* — Regiomontanus, pour mesurer les distances de deux astres, Martin Behaim pour prendre la hauteur méridienne du Soleil en mer, — mais il résulte des dernières recherches faites à ce sujet que l'invention remonte au XIVe siècle.

La *Bibliotheca mathematica,* journal très recommandable publié à Stockholm par Gustaf Eneström, contient dans son numéro 3 de l'année 1890 un article du professeur S. Günther, de Munich, intitulé *Die erste Anwendung des Jacobstabs zur Ortsbestimmung*, dont nous extrayons les intéressants renseignements qui suivent :

Lévi ben Gerson (*Leo israelita de Bagneolis*), auteur d'un Traité intitulé : *Geometriæ conclusiones, propositiones et structura Baculi Jacob, ejusque usus, ex libro manuscripto. Et hic tractatus fuit translatus de hebraeo in latinum anno Christi* 1342, est, autant qu'on en peut juger jusqu'à présent, l'inventeur du bâton de Jacob ou, tout au moins, le premier qui ait écrit à son sujet. Regiomontanus connaissait l'Ouvrage de Lévi et le procédé qui s'y trouve indiqué; il s'en est servi avec succès pour observer les comètes.

Certains Ouvrages de Sacro-Bosco semblent établir que Martin Behaim avait introduit parmi les marins portugais l'usage du bâton de Jacob dont il savait que Regiomontanus s'était servi précédemment : « Il est très remarquable, ajoute M. Günther, qu'une invention espagnole qui avait d'abord été se faire apprécier à Nuremberg et à Anvers, soit revenue ainsi dans la péninsule ibérique. »

. Quoiqu'il ne soit pas douteux que le bâton de Jacob ou de la croix (*Kreustab*) ait été employé fréquemment par les marins espagnols, portugais, hollandais (*voir* les livres nombreux et les estampes où il en est question et où il est représenté comme un instrument fondamental), il ne figure pas dans l'inventaire de ceux qu'emporta Magellan dans son voyage autour du monde.

On croit encore que le bâton de Jacob, qui a reçu tant de noms, s'est aussi appelé *cylindre,* la tige ou le bâton proprement dit (*voy.* plus loin *fig.* 12) ayant pu être cylindrique aussi bien que parallélépipédique. Du temps de l'empereur Maximilien Ier, on lit dans un rapport en portugais : « E teras tam ben sete apraz pa este caminho por companheiro deputado do nosso rey *Maximiliano* ho senhor *Martino Boemio* singularmente pa esto acabar : e outro muy muytos marinheiros sabedores que navegarã ha largũr do mar tornando caminho das ilhas dos Açores per sua industria per quadrate, *chilidro* o astrolobio e autros ingenhos. »

(1) M. H. Weissenborn, d'Eisenach, dans une Note insérée au tome I, nouvelle Série, de la *Bibliotheca mathematica,* 1887, et ayant pour titre *Ueber die verschiedenen Namen des sogenannten geometrischen Quadrates,* constate la confusion qui résulte des noms différents donnés à des instruments identiques.

Dans une autre Note, *Ueber die im Mittelalter zur Feld-messung benutz-*

TRIQUETRUM. — Le *triquetrum* sive *trium regularum instrumentum*, dont nous donnons une figure (*fig.* 10) d'après Tycho-Brahé, avait la forme d'un triangle isoscèle dont l'un des côtés égaux était fixe et vertical et sur lequel étaient articulés les deux autres; le second servait d'alidade et le côté variable n'était autre chose que la corde de l'arc de la distance zénithale de l'astre ou de l'objet observé; il portait une division en degrés.

Cet instrument aurait mérité d'être mentionné, ne fût-ce que parce qu'il a suffi à Copernic pour faire ses célèbres observations sur les planètes, mais il devait être aussi rappelé comme ayant servi de type à plusieurs instruments de Topographie également composés de trois règles formant toujours un triangle, dont l'un des côtés ou même deux étaient variables.

On rencontre, dans les anciennes collections, divers appareils de ce genre faciles à construire et qui, à cause de cela, ont pu être utilisés, mais nous citerons seulement celui d'Oronce Finé, peut-être l'un des plus anciens, dont nous donnons la figure (*fig.* 11) et qui était destiné, comme dit son auteur, *à mesurer les distances et les hauteurs par une seule station* (1).

« Pour entendre plus clairement l'intention de ce problème, » dit Oronce, faut sçavoir que le Triangle est comme regle et » addresse de toutes dimensions; d'autant que c'est le plus

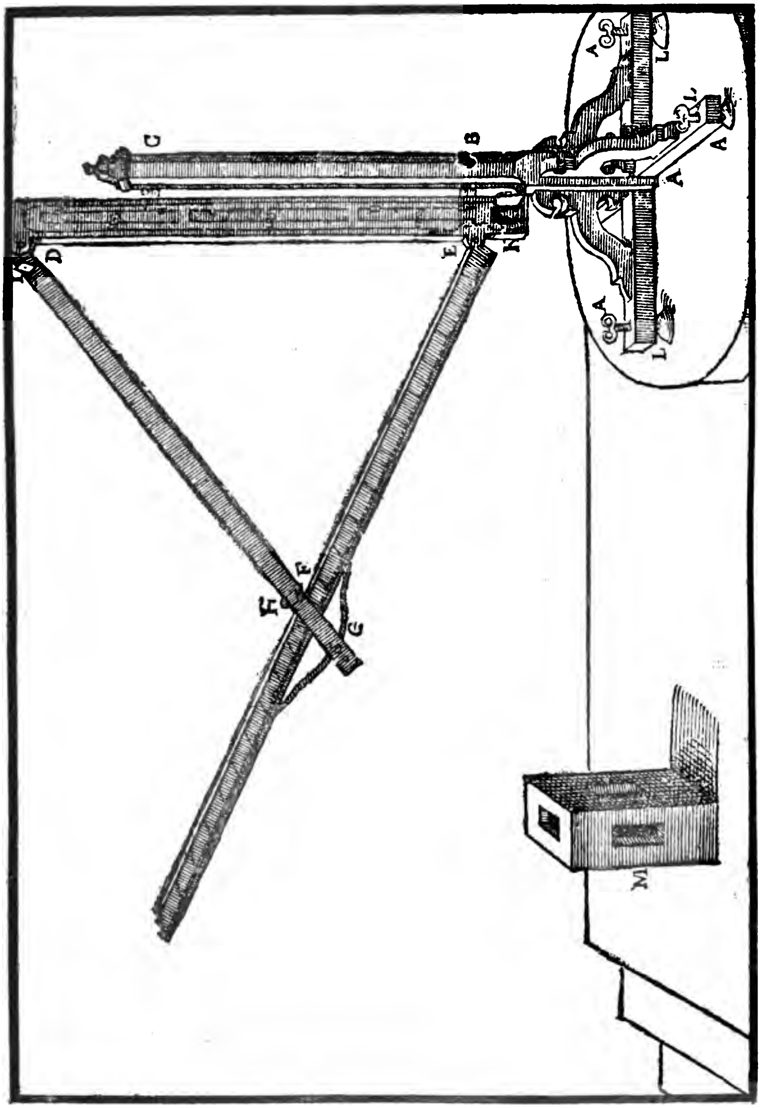
---

*ten Instrumente,* publiée récemment dans la *Bibliotheca mathematica,* M. Maximilien CURTZE, de Thorn, fait remarquer les analogies et les différences qui existent entre les instruments appelés *astrolabes* et *quadrants géométriques*, en mentionnant les autres noms qui leur ont été donnés.

(1) *La Practique de la Géométrie d'Oronce,* etc., reveuë et traduicte par Pierre FORCADEL (à Paris, chez Gilles Gourbin, MDLXXXV, p. 47). Oronce Finé, né à Briançon en 1494, mort à Paris en 1555, a été qualifié un peu ambitieusement du nom de restaurateur des Mathématiques en France. Ce qu'il y a de certain, c'est que notre pays était alors fort en retard et qu'Oronce a eu le mérite incontestable d'y raviver le goût des sciences exactes et de leurs applications à la Géographie.

On lui doit notamment une mappemonde cordiforme et une autre doublement cordiforme, enfin une des premières Cartes de France, à peu près exacte. Ces documents sont reproduits tous les trois dans la thèse latine de M. L. GALLOIS : *de Orontio Finæo gallico geographo; Parisiis, apud E. Leroux*, 1890, qui contient une intéressante biographie et une appréciation des œuvres principales d'Oronce Finé

Fig. 10.

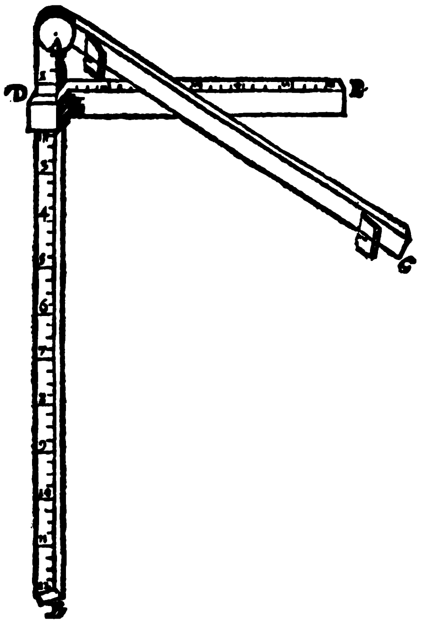


Triquetrum ou règle parallactique.

» simple de tous les rectilignes. Et pour ce, est-il le plus
» convenable pour mesurer toutes sortes de grandeurs. Et
» d'iceluy est tirée la composition de tous les instruments

» inventez pour mesurer : ainsi que nous déclarons icy par
» un instrument de notre façon ; ensemble montrerons la ma-
» nière de prendre la mesure des distances et hauteurs par
» une seule station ; mesure par l'astrolabe, par le Quarré

Fig. 11.



Instrument d'Oronce Finé.

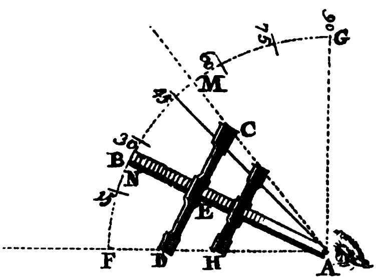
» Géométrique et par le Ray astronomique ; chose bien facile,
» toutesfois par cydevant encore non avisée... »

On le voit, par cette citation d'un auteur très renseigné sur tout ce qui avait été entrepris de son temps, en fait de Géométrie pratique, le triquetrum ou ses dérivés, l'astrolabe, le quarré géométrique et le rayon astronomique ou l'arbalestrille étaient les principaux instruments connus à cette époque pour évaluer indirectement les distances horizontales et les hauteurs verticales.

Nous pourrions encore indiquer bien d'autres Ouvrages du même temps dans lesquels ces instruments sont considérés comme destinés à la fois aux observations astronomiques et aux opérations topographiques ([1]), et l'on peut même dire que jusque-là ils étaient les seuls, indépendamment, bien entendu, de ceux qui servaient à effectuer les mesures directes, c'est-à-dire la chaîne et l'équerre d'arpenteur, sans oublier non plus la boussole dont le rôle se réduisait d'ailleurs auparavant à l'orientation des directions itinéraires.

L'Arbalestrille. — Nous nous bornerons, pour l'*arbalestrille* (*fig.* 12) dont nous connaissons bien l'histoire, à dire que

Fig. 12.




Arbalestrille.

la tige ou le *rayon* à section carrée portait sur ses quatre faces des divisions différentes, que les traverses appelées *marteaux* dont les extrémités servaient à viser étaient au nombre de trois et même de quatre et de longueurs variées correspondant à ces divisions, enfin que celles-ci étaient exprimées en degrés et faciles à obtenir par un simple tracé graphique.

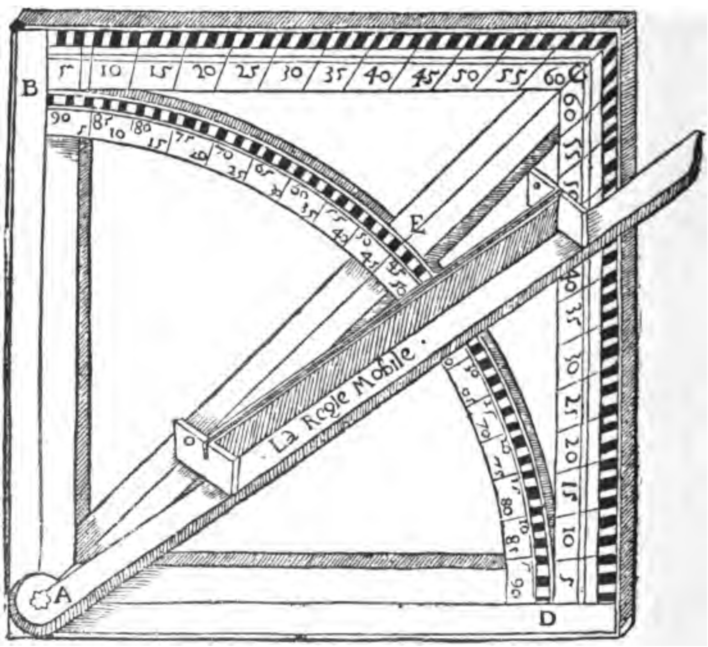
L'arbalestrille, très populaire autrefois jusque chez les maçons et les charpentiers, a été pendant longtemps employée par les marins, souvent même de préférence à l'astrolabe, quand

([1]) Il suffirait de renvoyer le lecteur au Recueil fondamental intitulé : *Scripta clarissimi mathematici M. Joannis Regiomontani, etc., aucta necessariis Joannis Schoneri Carolostadii additionibus, item, libellus M. Georgii Purbachi de quadrato geometrico* (Norimbergæ, MDXLIIII).

l'horizon était bien net, parce qu'en visant *simultanément* à cet horizon et à l'astre, on évitait les inconvénients du mouvement d'oscillation du disque suspendu de l'astrolabe (¹).

On comprend aussi que, dans les reconnaissances topographiques, cet instrument très portatif et facile à improviser ait dû être souvent utile aux voyageurs et aux militaires pour évaluer rapidement les distances et les hauteurs (²).

Fig. 13.




Quarré géométrique.

LE QUARRÉ GÉOMÉTRIQUE. — Il serait sans doute inutile de

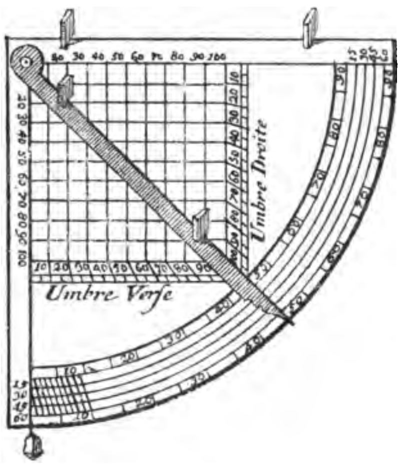
(¹) Peut-être, en raison de cette propriété, doit-on voir dans l'arbalestrille le précurseur du quartier anglais et, par conséquent, même de l'octant. Nous reproduirons cette conjecture plus loin.

(²) Voy. *La Practique de la Géométrie d'Oronce*, Liv. Iᵉʳ, Chap. VI; *Gia. Paolo Galucci*, Libro sesto, Cap. VI à Cap. XXV, etc.

nous arrêter à la description du *quarré géométrique* dont nous donnons deux figures (*fig.* 13 et 14), l'une extraite d'un petit Traité spécial assez ancien sur l'usage de cet instrument (1) et l'autre du Livre bien connu de Bion sur la construction des instruments de Mathématique (2), qui ne diffèrent guère l'une de l'autre malgré l'intervalle de deux siècles qui sépare les publications des deux Ouvrages.

Celui de la *fig.* 14 comporte cependant l'emploi d'une alidade fixe et d'un réseau ou *treillis* dont l'usage, facile à deviner, se

Fig. 14.




Quadrant géométrique.

trouve expliqué dans l'Ouvrage de Bion. Nous y joignons deux autres figures pittoresques représentant des opérateurs en train de mesurer, avec le quarré géométrique, l'un une distance

(1) *Quadrati geometrici usus, geometricis demonstrationibus illustratus,* per Joannem DEMERLIOREM, professorem Regium (Parisiis, MDLXXIX). Cet Ouvrage se trouve habituellement réuni au recueil dont nous avons donné le titre général dans une note précédente : *Scripta clarissimi mathematici M. Joannis Regiomontani, etc., item Libellus M. Georgii Purbachi.* On peut donc consulter en même temps le Traité de Purbach.

(2) Cet Ouvrage de Bion est cité plus loin avec son titre complet.

Fig. 15.

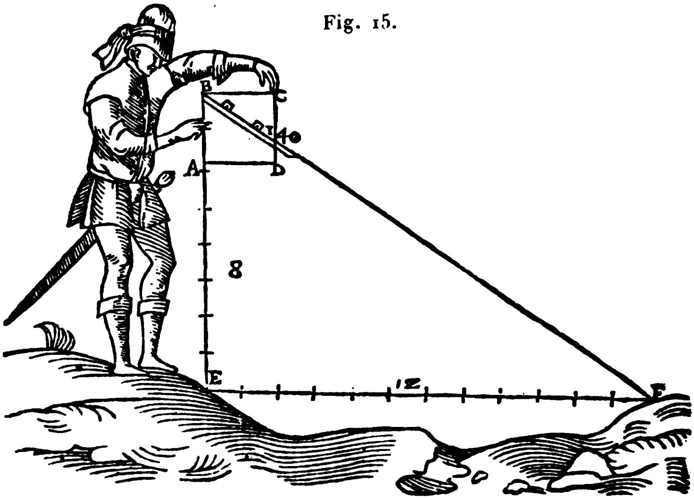
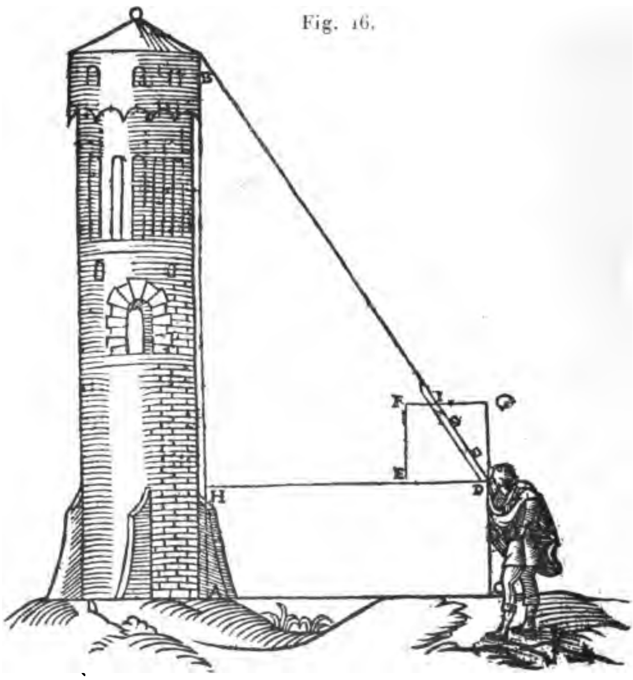



Fig. 16.




horizontale (*fig.* 15) et l'autre la hauteur d'une tour (*fig.* 16).

Pour les autres problèmes que servait à résoudre cet instrument analogue, nous le répétons, au quarré des ombres de l'astrolabe et aussi d'ailleurs à beaucoup de ceux dont nous faisons encore usage, nous renvoyons au Traité dont il s'agit ou à celui de Purbach dont il est la reproduction à peu près textuelle.

## VI. — *De la Renaissance à la fin du* XVII^e^ *siècle. Modification des instruments anciens.*

Pendant la période d'un siècle et demi qui s'étend de la seconde moitié du XVI^e^ siècle à la fin du XVII^e^ siècle, les instruments d'Astronomie, de Navigation, de Géodésie et de Topographie ont reçu de tels perfectionnements, qu'il serait aussi difficile qu'inutile, pour le but que nous nous sommes proposé, de chercher à en faire, en ce moment, l'historique complet. Nous n'avons, en effet, à nous occuper dans cette Notice que des progrès qui concernent directement et exclusivement la Topographie, et si, précédemment, il nous a fallu remonter aux instruments d'Astronomie pour trouver l'origine de ceux qui nous intéressaient, il n'en est plus de même actuellement, car, malgré l'analogie ou même l'identité des nouveaux organes essentiels que l'on rencontre chez les uns et chez les autres, les puissants appareils des observatoires diffèrent trop désormais, par leur construction et par leur manœuvre, des modestes outils de lever et de nivellement, pour qu'il soit à propos d'en donner une description même sommaire.

Nous ne ferons également que mentionner, en passant, les admirables instruments imaginés au XVII^e^ siècle, plus particulièrement destinés à la Navigation, et ceux qui ont servi aux grandes opérations géodésiques entreprises à la même époque et à plus forte raison ceux qui les ont suivis.

Nous allons tout d'abord retrouver plusieurs de ceux que nous connaissons déjà pour les voir participer par la suite aux

progrès des arts de précision auxquels nous venons de faire allusion, mais nous aurons à en signaler qui sont d'invention plus récente, les uns et les autres se transformant peu à peu pour répondre à des exigences nouvelles.

Le dessin topographique dont nous nous occuperons dans le Chapitre suivant se transformait lui-même, à partir de la première moitié du XVII<sup>e</sup> siècle, et les méthodes comme les instruments avaient dû se prêter à cette véritable métamorphose.

En dehors des opérations du cadastre encore assez rares chez nous et même en Italie où les traditions de l'antiquité ne s'étaient cependant jamais entièrement perdues, opérations qui ne comportaient guère d'ailleurs que l'emploi de la chaîne ou de la toise et de l'équerre, on avait jusque-là considéré la Topographie presque exclusivement au point de vue pittoresque; les cartes elles-mêmes ne renfermaient que des indications assez vagues du tracé des chemins, des distances et des positions relatives des lieux habités. On comprend bien, en effet, qu'il ne pouvait être alors question de travaux d'ensemble dirigés systématiquement, et c'était à grand'peine que les personnes les plus instruites et les plus éclairées parvenaient à se faire une idée de l'étendue des pays qu'elles parcouraient et, à plus forte raison, de ceux dont elles ne faisaient qu'entendre parler (1).

Les problèmes que nous avons rappelés concernant la mesure des distances ou des hauteurs de points éloignés ne se résolvaient, en général, que dans le but d'obtenir un renseignement immédiat. Il est intéressant de constater à ce propos l'influence des progrès de l'art militaire; car c'est surtout à

(1) Il faudra arriver au siècle de Louis XIV pour commencer à avoir des cartes exactes (voyez *Pl. B*); on peut se faire une idée des tâtonnements inévitables de la Cartographie en comparant les mêmes pays représentés dans les différents atlas les plus célèbres publiés depuis la Renaissance ou même en remontant aux cartes qu'Agathodemon avaient dessinées au V<sup>e</sup> siècle pour la Géographie de Ptolémée. On n'apprendra peut-être pas sans étonnement que Pétrarque, ce grand promoteur de la renaissance des lettres, fut aussi celui qui fit dessiner la première Carte moderne de l'Italie; il avait composé lui-même un itinéraire oriental et réuni un assez grand nombre de documents géographiques. Mais, sait-on aussi que cet autre grand poète, Le Tasse, était allé, plus tard encore, jusqu'à enseigner la Géométrie! tant il est vrai que l'on ne s'était pas encore avisé de la division du travail.

partir de l'emploi des bouches à feu que l'on voit se multiplier les instruments destinés à cet usage, puis se créer le besoin

Fig. 17.



Astrolabe de Gualterius Arsenius.

d'avoir des plans de plus en plus exacts des places fortes et de leurs abords, d'où résultait la nécessité de rendre ces instruments à la fois plus précis et plus maniables.

Les premiers peut-être auxquels on se soit avisé de recourir dans ce but sont encore l'astrolabe et la boussole.

Nous avons déjà cité le Chapitre de l'Ouvrage de Galucci

dans lequel il est dit que l'astrolabe pouvait servir à lever le plan d'une province et nous y avons aussi constaté l'emploi d'un *cercle entier* disposé horizontalement et celui de la méthode des intersections ou des triangulations.

Association de l'astrolabe et de la boussole. — On trouve, dès le milieu du xvi$^e$ siècle (de 1525 à 1565), ainsi que nous l'avons annoncé plus haut, des astrolabes munis d'une aiguille aimantée, placée près de l'anneau de suspension, qui ont été construits en Hollande par Arsenius, neveu du célèbre Gemma Frisius et qui ont sans doute servi à cet usage (*fig.* 17).

Cercle hollandais. — Un peu plus tard, au commencement du xvii$^e$ siècle, l'astrolabe se transformait tout à fait et prenait le nom de *cercle hollandais* [1]; l'araignée et le planisphère lui-même disparaissaient définitivement, l'aiguille aimantée était ramenée au centre, et, indépendamment des pinnules de l'alidade mobile, le cercle en portait quatre autres aux extré-

---

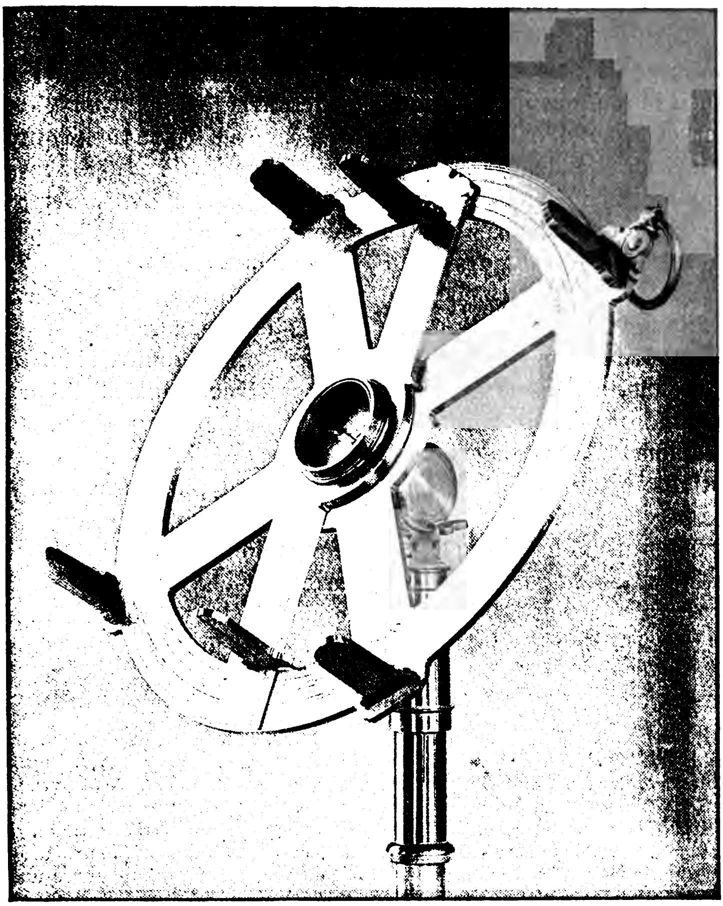
[1] Le cercle hollandais dont nous donnons la figure (*fig.* 18) appartient aux Collections du Conservatoire des Arts et Métiers; il n'est ni signé ni daté, mais grâce à l'extrême obligeance du savant secrétaire perpétuel de la Société hollandaise des Sciences de Haarlem, M. J. Bosscha, nous savons que cet instrument est décrit dans l'Ouvrage intitulé : *Tractact vant maken ende gebruycken eens nien gheordenneerden Mathematischen Instruments,* deer Jan Pieterszoon Dou (Amsterdam, 1620), qui existe à la Bibliothèque de Leyde. (*Traité de la construction et de l'usage d'un instrument mathématique nouvellement ordonné,* par Jan Pieterszoon Dou). D'après la préface, la première édition de cet Ouvrage était de 1612 et Jean Dou, fils de Pierre, arpenteur à Leyde, était l'inventeur de l'instrument.

Jean Dou, qui a aussi été un ingénieur distingué, était l'auteur de plusieurs autres Ouvrages dont le plus célèbre, composé en collaboration avec Johan Sems Haflinga, est le *Practijck des Landmeten,* publié à Leyde chez Jan Bonwensz, 1600, in-4°. On trouve sur ce livre et sur ses auteurs dans le *Bulletino di Bibliografia et di Storia* du prince Boncompagni, tome III, des détails très précis et d'autres renseignements intéressants. L'article rédigé par M. G. Vorsterman van Oijen a pour titre : *Quelques arpenteurs hollandais de la fin du* xvi$^e$ *et du commencement du* xvii$^e$ *siècle et leurs instruments.*

Le Conservatoire des Arts et Métiers possède, en outre, un *cercle entier* dont l'alidade porte la boussole et sur lequel on retrouve le quarré des ombres. Tangentiellement au cercle et parallèlement au diamètre qui porte deux pinnules fixes, il y a une règle qui pouvait servir à rapporter les angles quand l'instrument était séparé de son genou. Celui-là est daté de 1606 et signé Michael Coignet d'Anvers, et aurait précédé le cercle de Dou.

mités de deux diamètres rectangulaires, formant, par conséquent, une équerre. L'anneau de suspension était conservé et

Fig. 18.



Cercle hollandais.

permettait de laisser prendre au cercle la position verticale et de mesurer les hauteurs comme avec l'astrolabe, mais ce qui était nouveau et complétait l'appareil au point de vue de l'usage

auquel il était destiné, c'était le genou que l'on pouvait y adapter et qui servait à le monter sur un pied ou un bâton ferré, à le placer horizontalement ou à lui faire prendre l'inclinaison convenable pour l'amener dans le plan des deux objets dont il s'agissait de déterminer l'angle à la station.

Il suffit de jeter les yeux sur cet instrument pour reconnaître qu'il est parfaitement approprié à toutes les opérations que l'on peut avoir à exécuter sur le terrain; il peut, en effet, servir à recueillir les éléments d'un canevas trigonométrique, à lever les détails par cheminement à la boussole et par la méthode des coordonnées rectangulaires au moyen de l'équerre; il peut enfin procurer aussi les éléments du nivellement par la mesure des hauteurs positives ou négatives.

Ce cercle était si bien un dérivé de l'astrolabe qu'en 1625, Adrien Métius, dans l'un de ses excellents Ouvrages (¹), en en décrivant un tout à fait semblable, sans aiguille aimantée toutefois, lui conservait son premier nom. Il continuait d'ailleurs à le monter sur un bâton ferré, l'employait à résoudre tous les problèmes de distances et de hauteurs et enfin à des triangulations étendues dont les côtés atteignaient plusieurs milliers de perches (²).

Nous ne nous attarderons pas plus longtemps au rôle si évidemment important qu'ont joué les artistes, les astronomes, les géographes et les arpenteurs hollandais dans la construction et le perfectionnement des instruments; il faudrait un chapitre

---

(¹) Adriani Metii *Alcmariani Arithmetica*, Libri duo, et *Geometria*, Libri VI, etc. (*Geometr. pract.*, Pars secunda, p. 129 et suiv.). Lugd. Batavorum, ex officina Elzeviriana, anno CIↃIↃCXXVI (1626). Cet Ouvrage est, à coup sûr, l'un des plus intéressants et des plus complets qui aient été publiés à cette époque. Avec l'Arithmétique et la Géométrie pratique, il comprend les éléments de la fortification, la solution des problèmes uranographiques et le tracé des cadrans solaires, le tout rédigé avec une grande simplicité et une grande clarté.

(²) Nous devons avouer que c'est ce qui nous avait fait supposer que Snellius avait employé, de son côté, un cercle entier pour sa triangulation dont les côtés n'étaient pas plus grands que ceux dont parle Métius, et l'on ne peut qu'être étonné de voir l'usage des quarts de cercle se continuer si longtemps après les inventions (dont l'une au moins date de 1606, le cercle de Michael Coignet, d'Anvers) et les perfectionnements que nous venons de constater.

entier pour en donner une idée complète et nous ne devons ni ne pouvons entrer ici dans des détails trop minutieux qui souvent, d'ailleurs, ne rappelleraient que des tâtonnements abandonnés. Il nous suffira, pour achever de rendre hommage à l'initiative des Hollandais qui, en même temps qu'ils faisaient faire de grands progrès à la Navigation et à la Géographie, furent des premiers à reprendre les travaux de cadastre et de Topographie régulière, d'ajouter que c'est à l'un d'eux, Snellius, de Leyde, que l'on doit le premier essai fait en 1606 de la mesure d'un arc du méridien, celui d'Alkmaer, par la méthode des triangulations. Il y a lieu de remarquer toutefois que Snellius (1), et assez longtemps après lui encore, Picard et les autres astronomes français, qui devaient faire un si habile usage de cette méthode, n'ont pas employé des cercles entiers, mais des demi-cercles ou même des quarts de cercle pour la mesure des angles des triangles et des secteurs, ou tout au plus des quarts de cercle, pour l'observation des latitudes.

Cette préférence des arcs de cercle sur la circonférence entière qui remonte à Ptolémée (Hipparque, au contraire, n'a employé que les cercles entiers des armilles) se justifiait par la nécessité où l'on était d'accroître le rayon de la circonférence pour rendre les divisions plus exactes et plus nombreuses, et, pour éviter le poids et l'encombrement, on se contentait de la partie de la circonférence strictement nécessaire pour les mesures que l'on avait en vue.

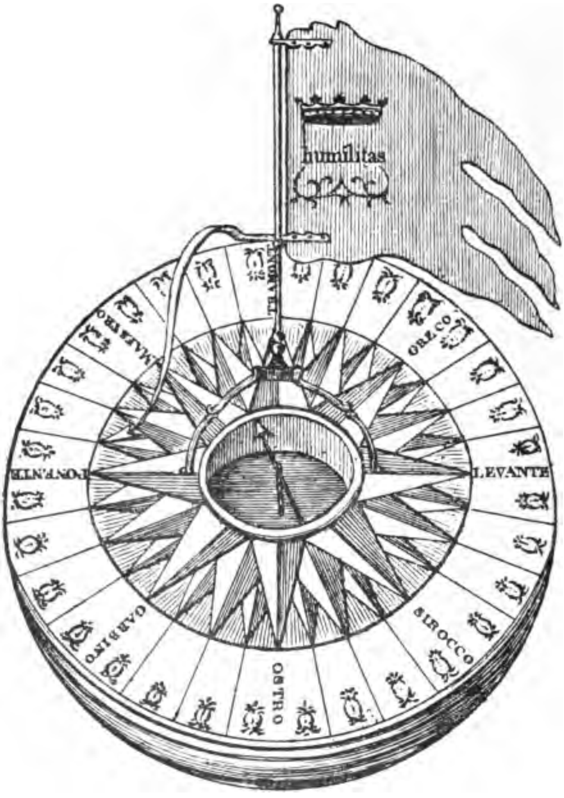
Ainsi, le quart de cercle suffisait pour mesurer les angles verticaux compris entre l'horizon et le zénith, et c'est ce qui explique la vogue persistante de tous les quadrants que l'on a même employés à la mesure des angles horizontaux, en substituant au besoin aux angles obtus leurs suppléments.

Toutefois, cette opération indirecte exigeant le prolongement souvent incommode de l'un des côtés de l'angle obtus, on alla jusqu'à la demi-circonférence; l'utilité de cette amélioration

(1) Contrairement à la supposition que nous avions faite dans la première et trop hâtive rédaction de ce premier Chapitre et dont nous venons de donner l'explication dans la note précédente.

qui s'accusait de plus en plus, quand on se mit à faire de la Topographie détaillée et régulière, conduisit à la construction

Fig. 19.



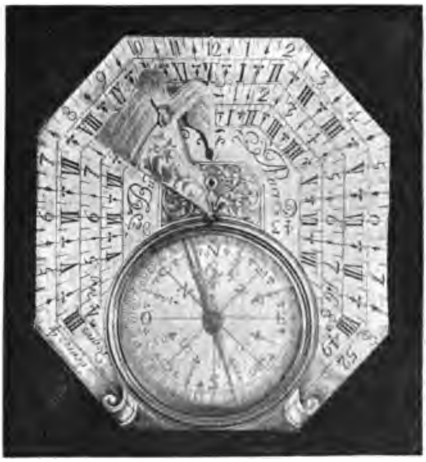

Boussole marine du XVI$^e$ siècle.

de l'un des instruments les plus répandus parmi les arpenteurs, pendant les trois siècles derniers, le *graphomètre*.

Comme cet instrument, qui a joué un rôle des plus considérables, comporte habituellement l'adjonction d'une boussole à la demi-circonférence divisée, nous devons, avant d'en donner la description, dire le parti que l'on avait déjà tiré de l'aiguille aimantée pour l'étude du terrain.

Nous ferons observer tout d'abord que les instruments dont les navigateurs et les voyageurs se servaient pour tracer leurs itinéraires et dont nous représentons deux types choisis (*fig.* 19 et 20) ne pouvaient pas être facilement utilisés en

Fig. 20.



Boussole de poche avec gnomon de Butterfield.

Topographie (¹); aussi, quand on s'avisa de recourir à la boussole pour lever des plans détaillés (peut-être d'abord dans les mines où l'orientation spontanée de l'aiguille aimantée devait être aussi précieuse qu'elle l'avait été en mer par les temps couverts), l'avait-on munie d'une alidade.

LA BOUSSOLE TOPOGRAPHIQUE. — La date précise de cet important perfectionnement n'est pas bien connue ou du moins

(¹) La première de ces deux figures (*fig.* 19) représente une boussole nautique ou compas de mer italien portant une girouette en talc aux armes des Borromée, avec une flèche ou index parcourant la rose des vents et faisant contrepoids à la girouette; la seconde (*fig.* 20) est une boussole de poche pour voyageur avec un cadran solaire et un gnomon qui peut se mettre à la latitude du lieu de l'observation. Cette ***boussole de Butterfield à Paris*** appartient aux ***Collections du Conservatoire des Arts et Métiers.***

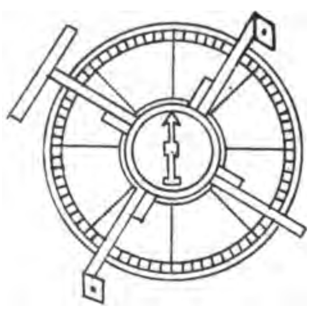
nous ne sommes pas parvenu à la découvrir, mais la description et l'usage de la nouvelle disposition de la boussole nous sont déjà donnés avec beaucoup de détails dans les *Quesiti et inventioni diverse*, de Nicolo Tartaglia, composés à Venise entre 1520 et 1560. Le Livre V de cet Ouvrage, aussi connu d'ailleurs qu'il est intéressant, a pour titre :

*Sopra el mettere over tuore rettamente in designo con el bossolo, li siti, paesi et similmente le piante delle città, con el modo de sapere fabricare el detto bossolo, et in diversi modi, la cui scientia da Ptolomeo è detta chorografia.*

On y trouve, en effet, la construction des principales parties de la boussole topographique et l'exposé des deux modes d'opérer par *rayonnement* et par *cheminement*, l'instrument étant monté sur un pied ou un bâton ferré semblable à celui de l'équerre d'arpenteur et servant ensuite, après en avoir été détaché, à *rapporter* les angles, comme on le fait encore communément aujourd'hui avec la boussole de mineur.

On remarquera sur la figure que nous reproduisons d'après Tartaglia (*fig.* 21) une traverse perpendiculaire à l'alidade

Fig. 21.



Boussole de Tartaglia.

avec laquelle elle est solidaire et terminée à l'une de ses extrémités par une règle parallèle à cette alidade. L'auteur explique comment, dans le cas de la méthode par cheminement, quand on rencontrait des murs le long des côtés du polygone à relever (par exemple, quand on faisait le plan

extérieur d'une forteresse en suivant l'escarpe), on pouvait appliquer cette règle contre le mur, s'en tenir ainsi toujours à la même distance très faible et opérer par conséquent parallèlement. Et il semble bien encore que cette précaution devait avoir été prise pour utiliser la boussole dans les mines.

PANTOMÈTRE [1]. — Avant de quitter Tartaglia, ajoutons que, de même que la plupart de ses contemporains, il s'occupait beaucoup d'art militaire, en particulier d'artillerie, et qu'il avait imaginé, pour évaluer rapidement les distances, un instrument que l'on pourrait comparer à la fois au *pantomètre* et au *télémètre*. Cet instrument se composait de deux *alidades rectangulaires* pouvant tourner au centre d'un quarré dont les quatre côtés portaient des divisions, remplaçant un cercle entier, comme le quarré géométrique remplace le quart de cercle [2].

On se servait, avons-nous dit, de ce petit appareil pour évaluer rapidement les distances de points éloignés et cela par la méthode si connue et si employée du triangle rectangle dont on mesure le petit côté qui sert de base et l'angle aigu à la base, méthode qu'il faut rapprocher de celles que l'on trouve reproduites par tous les auteurs de ce temps, quel que soit l'instrument dont ils enseignent à faire usage.

Nous trouverons bientôt l'un des plus célèbres avec lequel on les a également appliquées, le *compas de proportion;* mais revenons auparavant au graphomètre qui l'a vraisemblablement précédé et qui a certainement rendu beaucoup plus de services aux topographes.

---

[1] Ce nom s'applique à un instrument relativement moderne, bien connu des arpenteurs, mais l'on ne doit pas oublier que beaucoup d'inventeurs ont abusé d'expressions analogues sous le prétexte que leurs instruments pouvaient servir à tout, ainsi : *omnimètres, instruments universels,* etc. Il est également bon d'être prévenu, d'un autre côté, que des inventions, dont le principe était le même, ont reçu des noms différents plus ou moins heureux, quelques-uns bizarres. Nous avons évité, autant que possible, de les employer, en nous en tenant à ceux qui sont le plus habituellement en usage.

[2] TARTAGLIA. Libro terzo, propositione XII. La mention que nous faisons ici d'un instrument dont la disposition et les usages étaient les mêmes que ceux du pantomètre nous dispensera de nous arrêter à ce dernier qui en dérive évidemment ou plutôt qui lui est identique en principe.

## VII. — *Époque de la Renaissance* (Suite). *Introduction d'instruments nouveaux.*

Le Graphomètre. — Cet instrument, dont le nom signifie qu'il doit servir à la fois à mesurer et à dessiner les plans ([1]) paraît bien dater de la seconde moitié du xvi[e] siècle; il venait à propos pour compléter l'outillage des arpenteurs, réduit à peu près exclusivement sur le terrain à la chaîne et à l'équerre et dans le cabinet à la règle et au compas.

Avec sa demi-circonférence divisée et son alidade (*fig.* 22), le graphomètre permettait aux opérateurs de mesurer les angles de 0° à 180° et de déterminer graphiquement, *à l'aide du rapporteur* qui l'accompagnait (*fig.* 22), ou de calculer trigonométriquement les distances des stations qu'ils avaient choisies comme premiers points de repère, en un mot il mettait à leur portée la méthode de la triangulation ou des intersections avec toutes ses ressources.

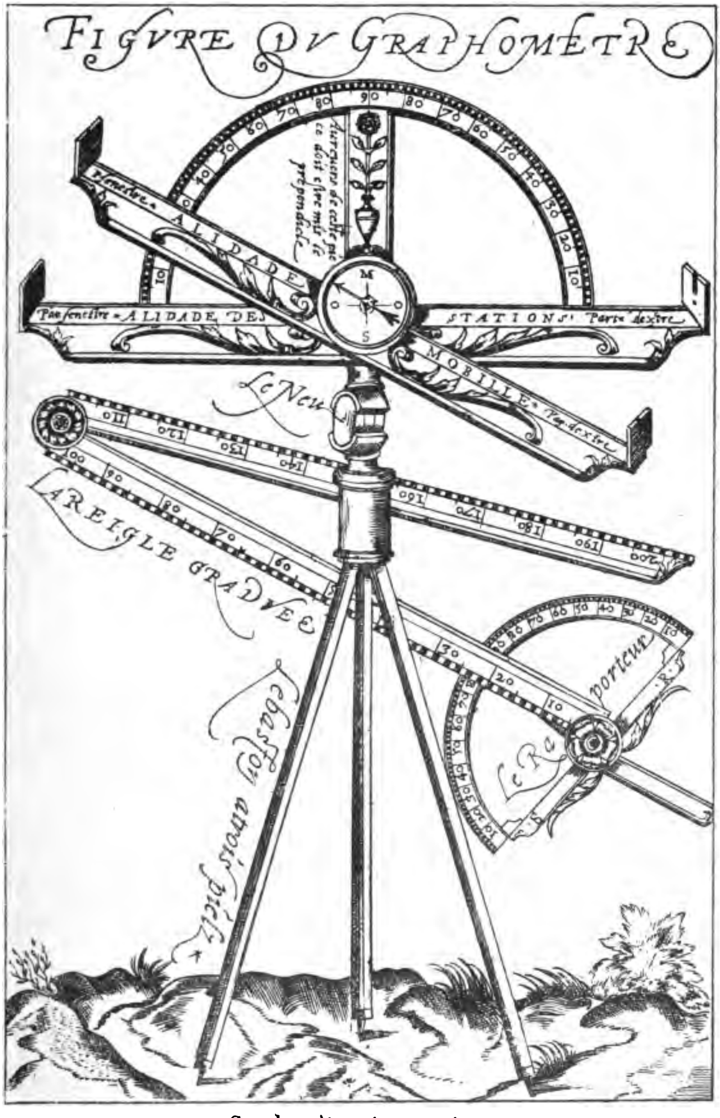
Monté sur un genou articulé, porté lui-même par un pied à trois branches, le demi-cercle du graphomètre pouvait être disposé dans un plan vertical, comme il l'est sur la figure pour permettre de mesurer les angles de hauteur, mais le plus habituellement on le ramenait dans la position horizontale et alors, la boussole dont il était muni ne servant, en général, qu'à l'orientation, on mesurait les angles *réduits à l'horizon* compris entre les objets considérés: signaux, points remarquables, etc., au moyen des deux alidades, l'une fixe et l'autre mobile.

Ainsi que nous l'avons dit plus haut, le graphomètre semble remonter à la seconde moitié du xvi[e] siècle; nous le trouvons, en effet, décrit complètement, pour la première fois, dans un

---

([1]) « Cet instrument est dit graphomètre à raison qu'avec iceluy l'on peut décrire et mesurer toutes choses visibles que l'on peut discerner, lequel comprend deux parties principales séparées l'une de l'autre; la première d'ycelles est nommée observateur et l'autre est dite rapporteur. » (Ph. Danfrie, dans l'Ouvrage dont le titre est donné ci-après). C'est la première fois que nous rencontrons explicitement le nom de *rapporteur* donné à un instrument spécial.

Fig. 22.




Graphomètre et rapporteur.

Ouvrage daté de 1597 et dont l'auteur, Philippe Danfrie, excel-

Fig. 23.




Emploi du graphomètre.

lent graveur, était en même temps un inventeur des plus ingénieux [1].

---

[1] *Déclaration de l'usage du graphomètre par la pratique duquel on peut mesurer toutes les distances des choses de remarque qui se pourront voir et discerner du lieu où il sera posé: et pour arpenter terres,*

Fig. 24.




Emploi du graphomètre. — Méthode des intersections.

Jusque-là il n'a été question que de la mesure des angles,

---

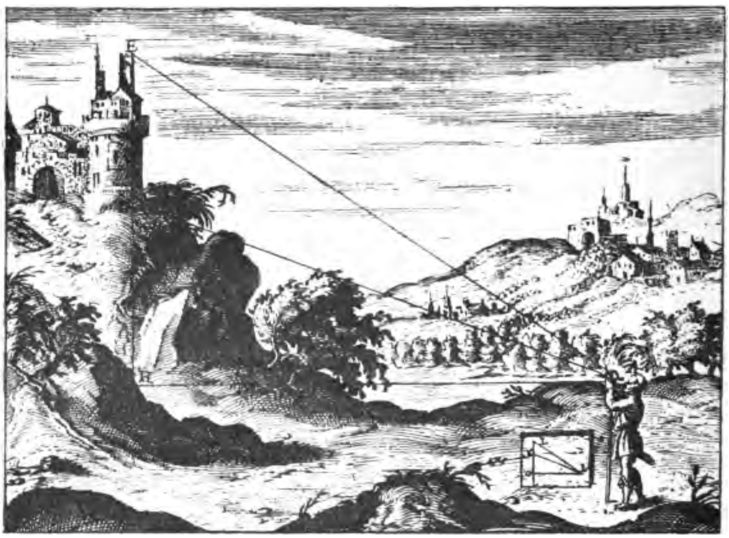
*bois, prés et faire plans de villes et forteresses, cartes géographiques et généralement toutes mesures visibles : et ce, sans reigle d'arithmétique.* Inventé nouvellement et mis en lumière par Philippe DANFRIE, tailleur général des monnoix de France, à Paris, chez le dict Danfrie; 1597.

mais pour *dessiner le plan, sans reigle d'arithmétique,* c'est-à-dire sans calcul, Danfrie employait le rapporteur (*fig.* 22) et il semblerait même qu'il opérât sur le terrain en se servant d'une petite planchette (*petit ais de bois*) sur laquelle était tendue la feuille de papier du dessin.

Les deux figures ci-dessus, que nous donnons d'après Danfrie, montrent les opérations à faire pour obtenir, avec le graphomètre, de deux stations dont la distance est connue, un point éloigné (*fig.* 23) ou même un ensemble de points (*fig.* 24) permettant de dessiner un plan par la méthode des intersections.

La figure suivante indique comment on peut déduire la hau-

Fig. 25.

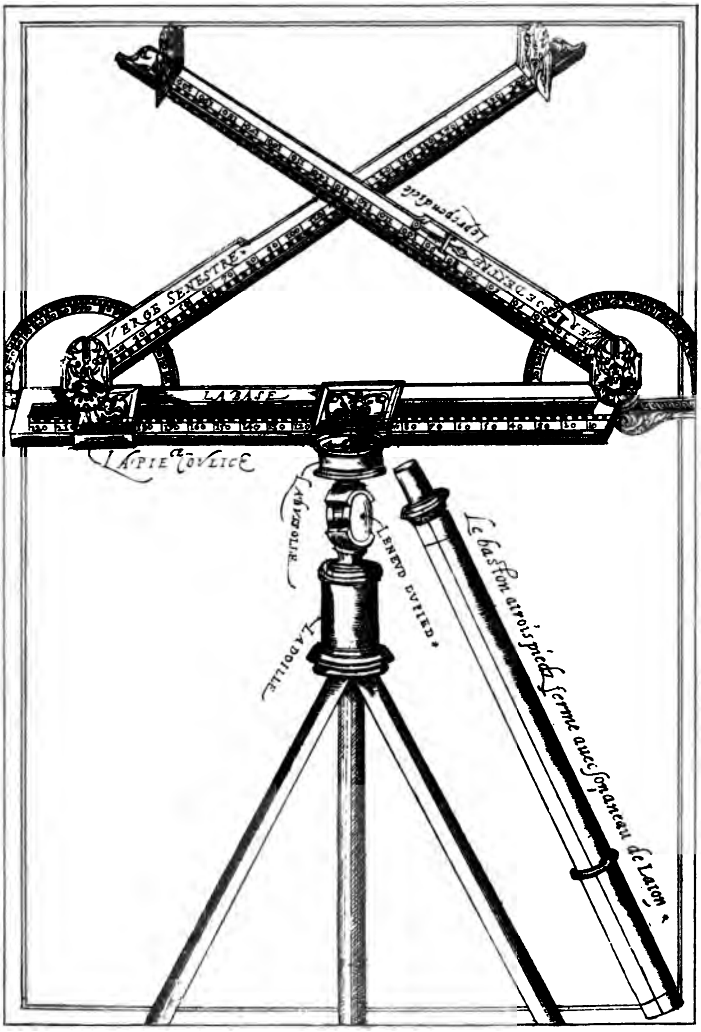


Emploi du graphomètre. — Mesure de la hauteur d'une tour.

teur d'une tour en l'observant d'une station dont la distance au pied de la tour est connue (*fig.* 25).

Dans les deux cas, les tracés graphiques effectués au moyen du rapporteur et de sa règle sont figurés sur la planchette.

Fig. 26.




Trigomètre de Danfrie.

**Trigomètre de Danfrie.** — Dans le même Ouvrage, Ph. Dan-

frie décrit sous le nom de *trigomètre* [1] un autre instrument ayant, comme il le dit lui-même, presque pareil usage et dont nous nous contenterons de donner la figure, en y signalant sur la branche droite (la verge dextre) un petit perpendicule, dont il est aisé de deviner l'usage, pour rendre cette branche verticale et en faisant remarquer que, dès cette époque, on avait cherché à construire le pied ou bâton à trois branches de façon à le réduire au plus petit volume possible pour le transport.

Le trigomètre, d'une construction assez compliquée, n'a d'ailleurs jamais approché de la popularité du graphomètre.

Pied de roy géométrique. — Mais Danfrie avait construit encore un troisième appareil dont il ne parle pas dans son Ouvrage et dont nous avons vainement cherché la description ailleurs, quoique nous croyions avoir découvert un instrument analogue dans l'un des trophées de la façade méridionale de l'Observatoire de Paris, composés par Perrault et représentés par la *Pl. A* [2].

Le hasard en a mis entre nos mains un exemplaire en parfait état de conservation, daté de 1589 et signé *Ph. Dăfrie*, que nous reproduisons dans sa position la plus habituelle (*fig.* 27).

D'après l'inscription qu'il porte sur ses deux branches, nous avons désigné cet instrument sous le nom de *pied de roy géométrique*. En redressant les branches, on a, en effet, un pied de roy divisé en pouces (l'un des pouces divisé en lignes), et la tige médiane qui, comme les deux branches, porte une pinnule à son extrémité extérieure guidée par deux petites tiges articulées, devient perpendiculaire à la règle du pied de roy. L'appareil ainsi disposé peut servir d'équerre, la pinnule

---

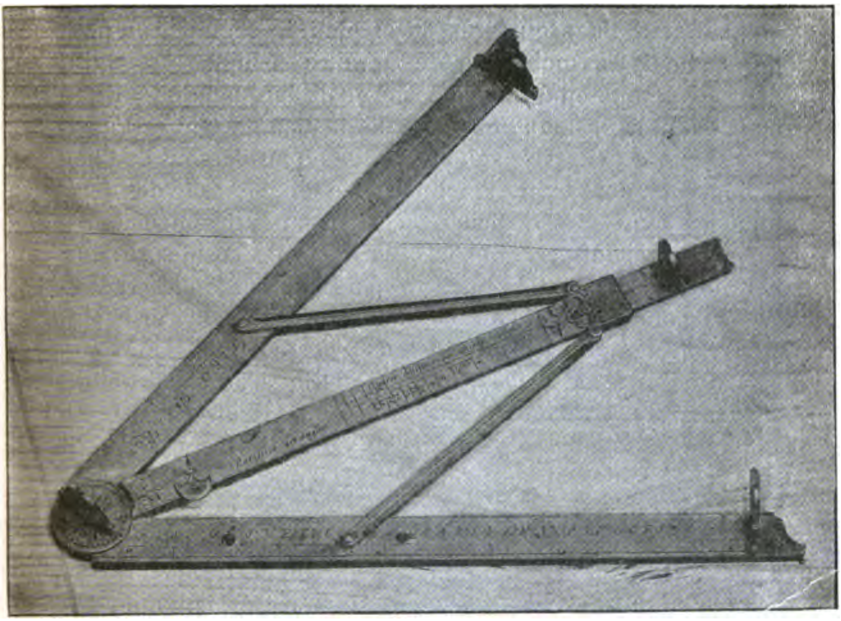
(1) Certains auteurs hollandais qui ont connu cet instrument l'ont appelé *triquètre*, oubliant sans doute que ce nom appartenait depuis longtemps à l'instrument de Ptolémée avec lequel il ne saurait être confondu, malgré son analogie, puisqu'il s'agit encore de trois tiges articulées formant un triangle.

(2) Ces deux trophées, indépendamment de leur charme artistique, sont particulièrement intéressants en ce qu'ils font connaître à peu près complètement les instruments dont les marins, les voyageurs et les arpenteurs se servaient pendant la seconde moitié du XVII[e] siècle.

placée au milieu de la règle pivotant autour de son centre et pouvant être rendue parallèle à celle de la tige médiane aussi bien qu'à l'une ou à l'autre de celles des deux extrémités de la règle elle-même.

Dans la position demi-fermée représentée par la *fig.* 27 et

Fig. 27.



Pied de roy géométrique disposé sur une planchette horizontale (moitié de la planchette).

en supposant une feuille de papier posée sur une planchette qui porte l'instrument, on peut y tracer, en suivant les bords intérieurs, l'angle des deux branches de la règle qui forment alidades successivement, la pinnule du sommet leur étant commune, et on lirait, au besoin, cet angle sur la tige médiane devenue la bissectrice qui porte une division le long de laquelle glisse le curseur entraîné par les petites tiges articulées. Mais le pied de roy géométrique a été visiblement destiné à être

fixé par l'un de ses côtés sur la planchette et par conséquent à servir immédiatement de *rapporteur*. La branche inférieure de l'instrument (*fig.* 27) porte, à cet effet, deux trous taraudés dans lesquels s'engageaient des vis portées par la planchette habituellement horizontale.

Celle-ci devait être, d'ailleurs, montée sur un pied muni d'un genou articulé qui permettait aussi de rendre son plan vertical et la tige médiane de l'instrument également verticale, car on voit sur cette tige, tout près de la pinnule centrale, un petit perpendicule très mobile encore sur notre exemplaire (*fig.* 28), dont l'extrémité en forme de flèche ou de dard indique sur une ligne de foi la position pour laquelle la tige devient verticale. Alors, que le point visé soit au-dessus ou au-dessous de l'horizon, on en peut tracer l'inclinaison le long de celle des deux branches qui a servi d'alidade ou la lire sur la tige médiane.

Ajoutons, pour terminer la description de ce très curieux instrument, que la tige médiane porte une seconde graduation à l'aide de laquelle on peut immédiatement diviser la circonférence en parties égales depuis 3 jusqu'à 20 [1].

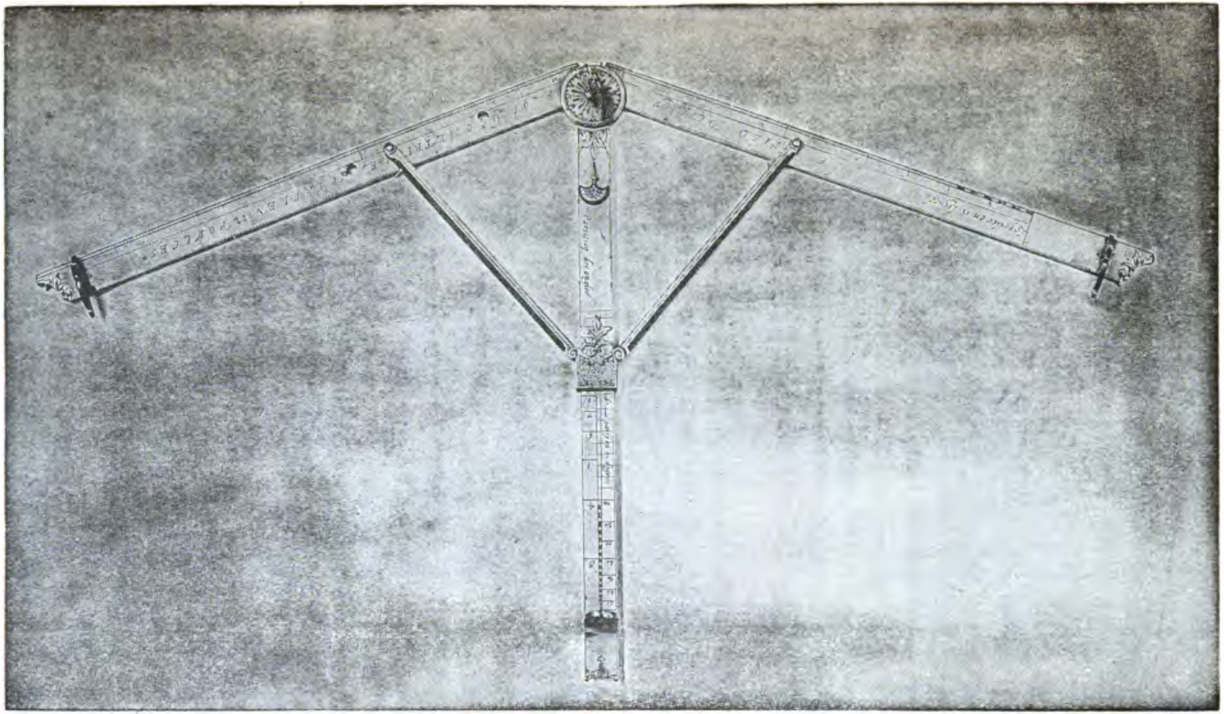
L'exemplaire du pied de roy géométrique de construction très élégante que nous possédons, signé de Danfrie et daté de 1589, ne laisse aucun doute sur la nature des opérations qu'il servait à exécuter sur le terrain, à l'aide d'une planchette posée tantôt horizontalement et tantôt verticalement. En rapprochant cette circonstance de celle que laissent deviner les *fig.* 23 et 24 et de la mention qui termine le titre de l'Ouvrage de Danfrie : *et ce sans reigle d'arithmétique,* il est évident que, dès cette époque, on cherchait à éviter les calculs trigonométriques en traçant immédiatement sur une planchette (*petit ais de bois*) les angles horizontaux relevés à l'aide de deux visées successives et les angles de hauteur ou de pente dont on pouvait avoir besoin.

Nous verrons par la suite que c'est sensiblement à la même

---

[1] On trouve, à la même époque, un instrument analogue servant à diviser en parties égales la ligne droite et le cercle et qui est sans doute la première idée du compas de proportion. (*Voyez* GALUCCI, Lib. otto, Cap. XXI. *Del modo di fabricare un compasso per dividere la linea et il cerchio in quante parti tu voi*).

Fig. 28.



Pied de roy géométrique supposé sur une planchette verticale.

date qu'a été imaginé l'instrument perfectionné composé d'une planchette maintenue toujours horizontale et d'une alidade mobile autour d'un demi-cercle vertical divisé, portés tous les deux par une règle pouvant prendre toutes les positions sur la planchette. Mais il faut convenir que ce perfectionnement (contemporain de l'invention du théodolite), qui permettait d'obtenir à la fois les angles horizontaux et les angles verticaux, ne s'est pas répandu aussitôt comme il le méritait. Nous devons donc nous contenter, pour le moment, de décrire les planchettes plus simples qui sont restées pendant si longtemps en usage, particulièrement en France, ainsi qu'en témoignent les Ouvrages de Topographie du XVII<sup>e</sup> et du XVIII<sup>e</sup> siècle, dans lesquels n'est pas même mentionné l'ingénieux pied de roy géométrique de Danfrie.

Planchette circulaire. — On trouve, au contraire, dans plusieurs de ces Ouvrages ([1]), la description d'une planchette procédant évidemment du cercle divisé qui y figurait pour le cas où l'on voulait évaluer les angles en degrés. Cet instrument se composait (*fig.* 29) d'un disque de bois ou de laiton monté, comme le graphomètre, sur un pied à trois branches avec un genou qui servait à le caler horizontalement. Au centre du disque se trouvait un pivot sur lequel s'engageait une alidade simple dont le bord de la règle passait lui-même par le centre ([2]). L'alidade étant enlevée, on posait sur la planchette une feuille de papier ou de carton mince, puis on replaçait l'alidade que l'on pouvait diriger sur les différents points à déterminer et sur un point déjà connu de position par rapport à la station que l'on occupait. On traçait sur le papier autant de lignes qu'il y avait eu de points visés, toujours le long de la règle de l'alidade, et l'on inscrivait à leur extrémité le nom de

---

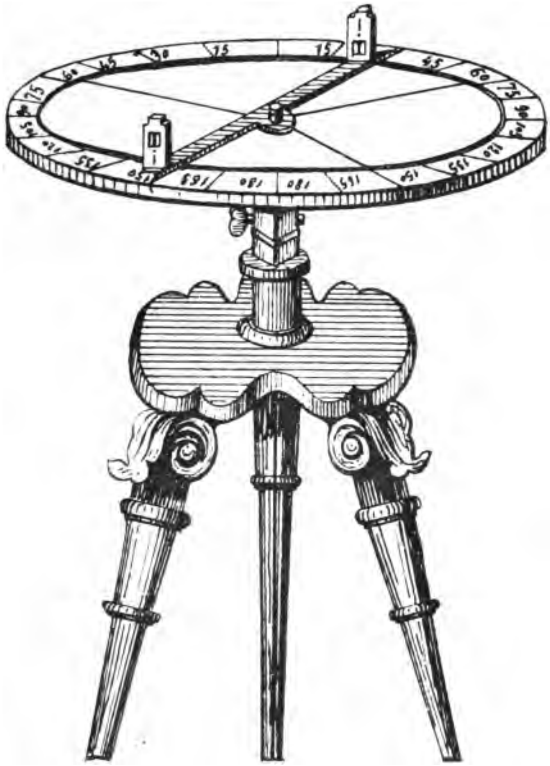
([1]) *L'École des Arpenteurs;* chez Thomas Moette à Paris, 1692. — Bion, *Construction et usage des instruments de mathématiques;* La Haye, 1723. — *Méthode de lever les plans et les cartes de terre et de mer, avec toutes sortes d'instruments et sans instruments;* chez Ch.-Ant. Joubert, à Paris, 1750, etc.

([2]) Depuis l'invention des lunettes, l'alidade avait été, dans les instruments qui visaient à la précision, remplacée par une lunette terrestre et, plus tard, par une lunette astronomique avec une croisée de fils au foyer.

l'objet, un numéro ou une lettre pour désigner ou faire distinguer les différents points les uns des autres.

La même opération étant faite, en chaque station, sur un nouveau disque de papier, on orientait ceux-ci successivement

Fig. 29.



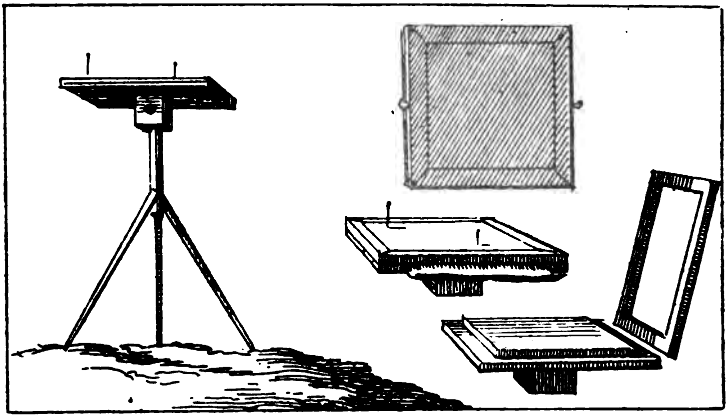
Planchette circulaire.

sur une feuille plus grande où devait être construit le plan, en commençant par les deux extrémités d'une *base* et l'on marquait au pourtour de chacun un trait auprès duquel on reproduisait l'indication propre à faire reconnaître le point visé correspondant.

**Planchette carrée simple.** -- Avec la planchette circulaire,

on ne construisait donc pas sur le terrain, car si l'on pouvait exécuter avec succès une triangulation graphique servant à déterminer des points de repère assez nombreux, on ne devait pas songer à relever immédiatement les détails. La planchette carrée, au contraire, avec une alidade libre ou même sans alidade, permettait de dessiner ces détails sur le terrain et l'on comprend que les deux systèmes aient été employés

Fig. 30.



Planchette carrée simple.

simultanément, la planchette circulaire pour effectuer la triangulation et l'autre pour lever le plan proprement dit.

Cette dernière, c'est-à-dire la planchette carrée simple, *sans alidade*, est décrite dans les Ouvrages du XVII^e^ siècle et en particulier dans le *Traité de Géométrie* de Sébastien Le Clerc, duquel nous extrayons l'indication suivante et les figures qui en sont le meilleur commentaire.

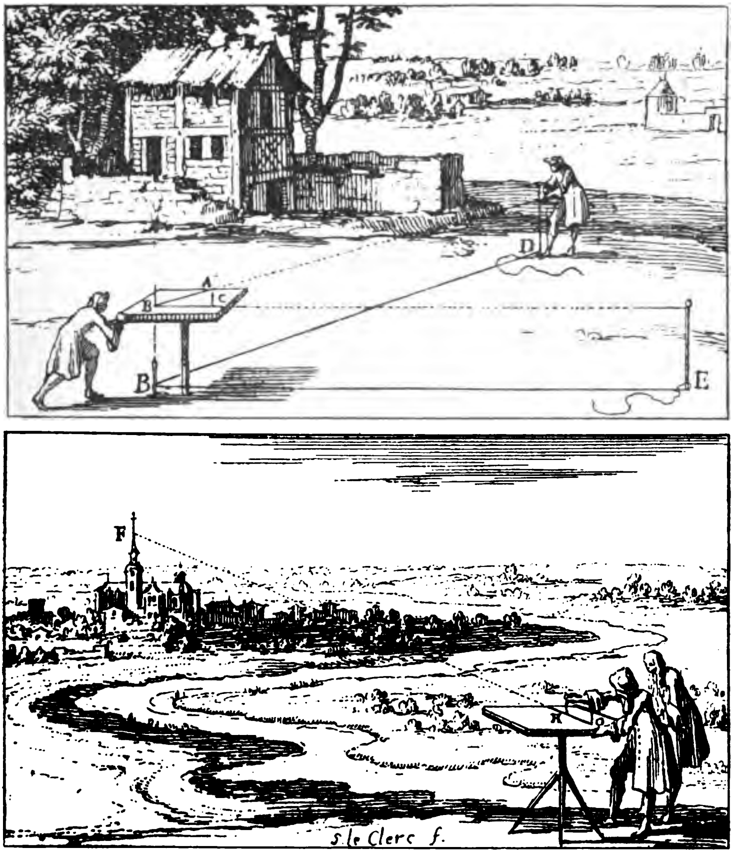
« La planchette est un ais d'environ douze ou quinze pouces en carré, montée sur un pied à trois branches.

» On travaille sur cette planchette comme sur une petite table, le papier y est arrêté avec un châssis qui s'emboîte au bord et les lignes qu'on tire dessus se dirigent par des épingles qu'on fait servir de viseurs et de petits piquets. »

Comme on le voit sur les *fig.* 30 et 33, la planchette simple

reposait sur un cube percé de trous en dessous et latéralement, ce qui permettait de changer rapidement la position

Fig. 31 et 32.




Emploi de la planchette simple sur le terrain.

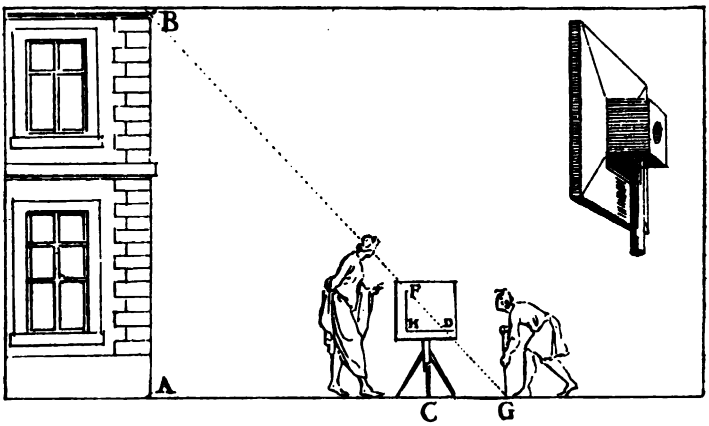
ordinaire de la tablette et de la rendre verticale pour obtenir les angles de hauteur ou de pente, ainsi que cela a été déjà indiqué à propos du pied de roy géométrique.

Enfin, on est allé jusqu'à se servir du bord supérieur de la planchette comme d'une ligne de niveau (*fig.* 34).

Il est sans doute inutile de faire remarquer le peu d'exacti-

tude que devaient comporter des opérations faites dans de sem-

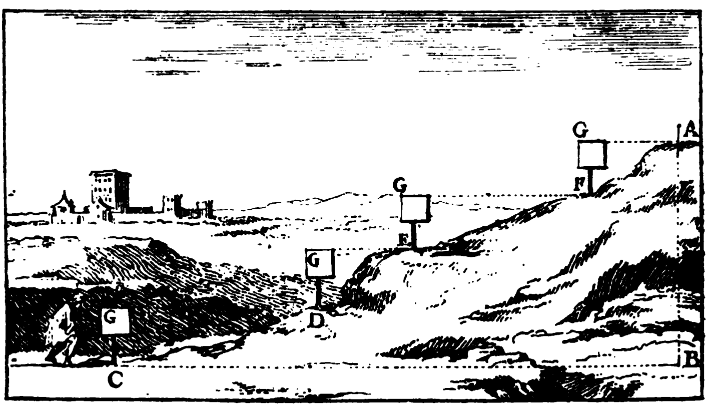
Fig. 33.




Planchette disposée verticalement.

blables conditions, mais nous reviendrons plus loin sur les

Fig. 34.




Planchette servant de niveau.

perfectionnements successifs de la planchette qui est devenue, comme on le sait, un véritable instrument de précision.

(*A suivre.*)

LES

# INDUSTRIES D'ART

## DE LA TUNISIE,

**Par M. Jules PILLET,**

Professeur au Conservatoire des Arts et Métiers,
Inspecteur honoraire de l'Enseignement du dessin et des Musées, etc.

Cette Note a pour objet d'exposer, sommairement, les résultats de la mission que M. le Ministre de l'Instruction publique, sur la proposition de M. le Directeur des Beaux-Arts, a bien voulu me confier, en mai 1895, pour étudier les principales industries d'art de la Tunisie.

Dans une première Partie, que j'intitulerai *Constatations*, j'exposerai les résultats que j'ai observés ainsi que les procédés d'exécution dont j'ai pu me rendre compte. Dans une seconde Partie, sous le titre de : *Propositions,* j'indiquerai les mesures que, suivant moi, l'on pourrait prendre, soit pour encourager, en augmentant leurs débouchés, les industries qui sont prospères, soit pour relever celles qui sont en décadence.

Mon travail est fort incomplet, je le sais; il l'eût été bien plus encore sans le bienveillant accueil que j'ai trouvé aussi bien auprès des Autorités et des Chefs de service, que des nombreux amis, presque tous mes anciens élèves, que j'ai eu le plaisir de retrouver à Tunis. Par les renseignements qu'ils m'ont fournis et par les facilités qu'ils m'ont procurées, ils m'ont singulièrement aidé dans mes études.

# PREMIÈRE PARTIE.

## CONSTATATIONS.

### CHAPITRE I. — LES INDUSTRIES D'ART A TUNIS.

#### 1. — Classement de ces industries.

*Les souks de Tunis.* — Une visite de quelques heures dans les bazars, ou *souks,* de Tunis, est indispensable pour quiconque veut étudier les industries d'art de cette ville; elle est à la fois instructive et attrayante. Je suis entré dans les ateliers des souks; dans beaucoup d'entre eux je suis resté plusieurs heures; j'ai vu travailler les ouvriers; je leur ai posé des questions; j'ai cherché à me rendre compte de leurs supériorités ainsi que de leurs faiblesses; j'ai tenté de connaître leurs désidérata, ce qui n'est pas très facile, car ils sont un peu méfiants. Je me suis, surtout, attaché à comprendre le côté *technique* des industries d'art que j'étudiais, car j'estime qu'il est indispensable de connaître, jusque dans leurs détails, les procédés de la fabrication ainsi que les ressources que puise cette fabrication aussi bien dans les produits bruts du pays que dans le génie et même dans les habitudes de travail des ouvriers, si l'on veut conduire ces industries dans une voie artistique féconde et sûre, sans risquer de les tuer en les violentant.

*Industries étudiées.* — Dans l'impossibilité matérielle où j'étais de tout étudier, j'ai cru devoir, à Tunis, porter mon attention sur les industries suivantes :

(*a*) La *céramique,* surtout au point de vue des carreaux de revêtement et de la décoration architecturale.

(*b*) Les *broderies,* de soie, d'or et d'argent sur étoffes et sur cuirs.

(*c*) Les *damasquinures,* ou incrustations de fil d'or ou de fil d'argent sur acier.

(*d*) La *menuiserie* et les *bois tournés.*

(*e*) Le *Nakch-Hadida,* ou ciselure d'ornement sur plâtre.

La bijouterie d'or ou d'argent, très largement représentée dans les souks de Tunis, m'a semblé camelote. D'ailleurs elle n'est pas en souffrance; elle suffit aux besoins de la population indigène; c'est dans cette dernière qu'elle trouvera toujours son principal débouché; je n'en parlerai pas.

J'étudierai plus loin, à *Nabeul,* la poterie et la sparterie, et à *Kaïrouan* la fabrication des tapis.

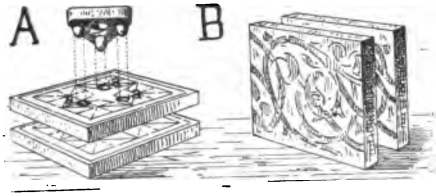
## 2. — La céramique.

*Carreaux céramiques anciens.* — L'industrie des carreaux de revêtement, en faïence émaillée, est, pour le moment, la seule qu'il faille, suivant moi, essayer de faire revivre à Tunis.

Cette industrie a été fort brillante autrefois, ainsi que le témoignent certains revêtements au *Bardo,* au *Dal-el-Bey* (palais du gouvernement), au palais *Hussein* (résidence de l'état-major) et dans beaucoup d'autres édifices, palais ou maisons particulières.

On reconnaît les carreaux indigènes, anciens ou modernes, à trois points (*fig.* 1, A, *a, a, a,*), disposés aux sommets d'un

Fig. 1.




triangle équilatéral pour lesquels l'émail fait défaut. Ces points, où apparaît la terre cuite rouge, sont les traces des pieds d'un petit support triangulaire en terre cuite, nommé par les ouvriers *chameau,* ou encore *pied-de-coq,* ou encore *pernette,* qui sert à empiler dans le four les carreaux, par colonnes verticales (*fig.* 1, A), en tenant leurs faces horizontales; il supporte les carreaux en même temps qu'il laisse entre eux le

vide nécessaire pour faciliter la circulation de la flamme. En France, on enfourne en disposant les faces des carreaux suivant des plans verticaux (*fig*. 1, B); les *pernettes*, dans ce cas, sont inutiles.

Je croirais volontiers que la disposition tunisienne, dans laquelle les carreaux sont horizontaux, est, au point de vue artistique, préférable à la disposition française; avec elle les émaux ont moins de tendance à couler pendant la cuisson, ce qui permet de les prendre plus fusibles, de les appliquer en plus grande épaisseur et d'obtenir ainsi des tons plus profonds, plus nuancés et plus modelés dans leur masse.

Les carreaux deprovenance européenne, pris un à un, sont souvent d'une fabrication irréprochable; le dessin en est très régulier, les émaux en sont d'une coloration parfaitement égale dans toute leur étendue. Il en est ainsi parce que, le plus souvent, ces carreaux sont fabriqués mécaniquement, que les traits et que les poudres d'émail sont imprimés par des procédés industriels.

Un carreau tunisien, au contraire, examiné seul, paraît grossièrement fabriqué; les traits sont irréguliers; deux carreaux d'un même modèle ne sont pas rigoureusement semblables; les teintes obtenues par la fusion des émaux ne sont jamais des teintes plates. On reconnaît que l'exécution a dû en être confiée à des mains peu exercées, souvent à des mains d'enfant.

Les trois points dégarnis d'émail choquent et semblent indiquer une exécution vicieuse; et, cependant, garnissez deux surfaces murales avec les uns ou avec les autres; le mur garni de carreaux européens semble froid et presque monotone; l'autre, au contraire, est vibrant et en quelque sorte vivant par le fait même de l'irrégularité de ses éléments constitutifs. J'insiste sur cette constatation, très importante au point de vue artistique, afin de faire prévoir, dès maintenant, le danger qu'il y aurait à introduire, avec excès, les procédés mécaniques dans la fabrication des carreaux de revêtement.

*État actuel de cette industrie.* — Lors de mon passage à Tunis, un seul ouvrier, patron, était encore capable d'exécuter des carreaux semblables aux anciens. Je l'ai vu; il était vieux

et disait ne plus savoir où trouver les émaux de certaines couleurs; on ne lui faisait plus que de très rares commandes et il en était réduit à fabriquer des tuyaux.

Il était à ce point découragé, qu'il a fait de son fils un ouvrier cordonnier plutôt que de lui transmettre les secrets de son art. Cependant, il avait du talent; ses prix étaient excessivement bas. Les carreaux céramiques de provenance italienne, malgré la médiocrité de leur composition et de leur exécution, ont, à cause de leur bas prix et surtout à cause de l'abondance avec laquelle ils sont offerts, tué les carreaux indigènes. Les carreaux en ciment coloré leur ont également porté un coup funeste.

Il faut, à tout prix, faire revivre dans la Régence, soit à Tunis, soit peut-être à Nabeul, l'industrie jadis si florissante des carreaux de revêtement. Lorsque ce résultat sera obtenu, on tâchera de créer celle des faïences du bâtiment (tuiles, chéneaux, faîtières, épis, frises, etc.).

### 3. — Les broderies de soie, d'or ou d'argent sur étoffes et sur cuirs.

*Visite chez l'Amin.* — Les ouvriers de cette partie sont, en général, fort habiles. Ils ont pour *Amin* [1] un homme d'une grande valeur. Je l'ai prié de travailler et de faire travailler sous mes yeux; je lui avais donné, par quelques traits, les lignes principales d'une broderie d'argent à exécuter sur un porte-monnaie en velours; je lui laissais, néanmoins, toute latitude pour le détail de sa composition.

Les ouvriers brodeurs sont d'une habileté incomparable; il me paraît cependant peu important de décrire leur manière de faire.

L'intérêt, pour moi, résidait surtout dans la manière dont

---

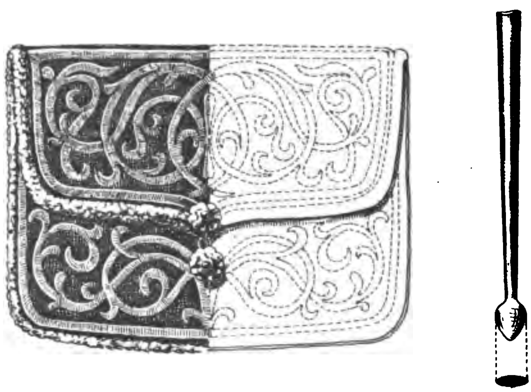
[1] L'*Amin* est, en quelque sorte, le syndic d'une industrie. En général, c'est l'homme reconnu par ses collègues comme étant le plus habile dans leur profession et aussi le plus honorable. On le consulte au point de vue technique et il tranche les différends, de peu d'importance, entre les patrons et les ouvriers. Il est nommé à l'élection.

l'*Amin* procédait pour composer sa *maquette* et pour préparer le travail de ses ouvriers.

*Composition d'une maquette.* — Malgré qu'il m'ait dit qu'il s'inspirait d'une certaine fleur dont j'ai oublié le nom et qui, dans le pays, possède un caractère symbolique, il m'a semblé que les figures décoratives qu'employait l'Amin lui étaient surtout familières et qu'il devait les utiliser souvent; on voyait, en un mot, qu'il les avait dans la main. Ainsi que le montre le croquis ci-joint (*fig.* 2, A) qui est la reproduction

Fig. 2.

A B



du porte-monnaie en question, ces éléments ornementaux se retrouvent dans presque toutes les décorations arabes. D'ailleurs, comme chez nous, dans tout bureau bien tenu, il conserve précieusement ses maquettes; il les consulte pour tout travail nouveau et, même, il les présente aux clients qui viennent lui commander un travail, afin de faciliter leur choix. En somme, pour composer, il m'a semblé qu'il procédait surtout par tradition, en faisant appel à sa mémoire, très bien garnie, du reste; je doute fort qu'il cueille souvent une plante pour en faire, en la *stylisant,* le motif d'une décoration originale.

*Tracé de la maquette.* — Sur un papier spécial, épais et onctueux, sorte de papier buvard résistant, le dessinateur exé-

cute du premier coup, sans esquisse préalable, son dessin. Le trait se fait à l'aide d'une pointe, en forme de cœur (*fig.* 2, B), que l'on pousse devant soi, comme fait un graveur avec son burin. Cette pointe trace un sillon bien visible sur le papier, sans néanmoins traverser ce dernier; et comme, à cause de la symétrie du motif, le papier a d'abord été plié en deux, il en résulte que, du même coup, le dessin se décalque sur la moitié qui est repliée et que, en dépliant le papier, on possède le motif tout entier, d'une symétrie parfaite.

La forme arrondie de cette pointe traçante donne aux lignes du dessin une grande continuité dans leur courbure; les rinceaux ainsi obtenus sont sans jarrets et d'un beau caractère. Il m'a semblé que, en le poussant, le dessinateur tenait cet outil d'autant plus près de la position horizontale que la ligne à tracer se rapprochait plus d'une ligne droite; pour marquer le point d'arrêt d'un trait, il le plaçait presque vertical. Quelle que soit la façon dont il opérait manuellement, il est certain que l'Amin était fort habile, car il a imaginé et exécuté la composition ci-contre en cinq ou six minutes. C'est le seul cas où il m'ait été donné de voir dessiner une maquette.

En résumé, cette industrie des broderies est très florissante à Tunis et dans toute la Régence; je ne la crois pas en décadence. En dehors des ouvriers de profession, beaucoup de femmes exécutent, chez elles, des broderies d'or et d'argent, soit pour s'en parer, soit pour les vendre.

J'estime que tous ces produits pourraient, plus qu'ils ne le font aujourd'hui, franchir la frontière de la Tunisie et trouver en Europe de nombreux débouchés chez les selliers et maroquiniers, chez les tapissiers, chez les couturières, chez les modistes, etc.

## 4. — Les damasquinures ou incrustations de fil d'or ou de fil d'argent sur acier.

*Description du procédé.* — Une surface plane ou courbe, en acier demi-dur, bleui au feu, est préalablement rayée dans tous les sens avec une lame d'acier trempé (en général

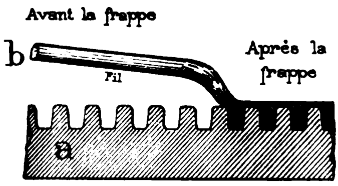
un vieux sabre de Damas). Cette surface, qui primitivement était parfaitement lisse, est ainsi transformée en une succession de creux et de reliefs, presque microscopiques, à arêtes d'autant plus vives et d'autant plus coupantes que le sabre est plus affilé.

L'habileté de l'ouvrier *strieur* consiste à manier le sabre de telle sorte que les *stries* soient très rapprochées les unes des autres et très également distribuées. Quand il a strié dans un sens, il strie ensuite dans le sens perpendiculaire.

Cela fait, un autre ouvrier, le *frappeur*, vient alors, avec une adresse extrême, présenter d'une main un mince fil d'or ou d'argent auquel il fait prendre toutes les formes qu'il veut; de l'autre main, avec un marteau d'acier très léger, il frappe sur le fil au fur et à mesure qu'il le présente. Sous l'influence de ces coups, très rapidement répétés, le fil, qui est très malléable, s'incruste, pour n'en plus pouvoir sortir, dans les creux préparés tout à l'heure.

Le croquis ci-joint (*fig.* 3, *a*) montre, très grossie, une coupe de la surface ainsi préparée; on voit au-dessus, en *b*,

Fig. 3.




le fil d'argent ou d'or prêt à être enchâssé, *serti* en quelque sorte dans les creux de la surface.

On comprend que par ce procédé on puisse, comme on le ferait avec la pointe d'un crayon, reproduire tous les dessins *filiformes* que l'on peut imaginer; on peut soit se borner à des contours, soit figurer des hachures plus ou moins serrées, soit même obtenir des champs complètement recouverts; en un mot, tout ce que donnerait la gravure sur bois, on peut le réaliser par ce procédé, mais en blanc sur noir au lieu d'être en noir sur blanc.

*Prix de revient.* -- J'ai suivi de très près ce travail et j'ai constaté que, dans l'espace d'une heure, un ouvrier habile pouvait recouvrir par une décoration, ni trop simple ni trop compliquée, une surface de un décimètre carré environ, ce qui représente, à peu près, 0fr,30 de main-d'œuvre. Un brunissage et, au besoin, un polissage terminent ce travail.

La matière précieuse, or ou argent, qui entre en jeu est d'un poids minime à cause de son extrême ténuité; le support en acier est d'un prix peu élevé; la main-d'œuvre, on vient de le voir, est peu importante et cependant cette décoration est d'un grand effet et d'une solidité à toute épreuve.

*Avenir et chances d'exportation.* — Pour toutes les raisons qui précèdent, je crois que cette industrie est, elle aussi, susceptible de fournir des produits d'exportation. Les Tunisiens l'appliquent surtout à la décoration d'objets de sellerie (mors, étriers, etc.). Mais un industriel français qui enverrait à Tunis des pièces en acier toutes préparées, avec les poncifs des dessins à traduire en incrustations à leur surface, pourrait faire exécuter, par ce procédé, une foule d'objets destinés aux intérieurs d'édifices, tels que coffrets, vases, lustres, candélabres, rampes d'escaliers, plaques de serrures, plaques de cheminées, frises décoratives, etc.

## 5. — Menuiserie et industries du bâtiment.

*Insuffisance technique, ignorance du dessin.* — Les Indigènes ont le sentiment de la menuiserie élégante, mais le côté technique leur fait, aujourd'hui, presque totalement défaut. Les assemblages sont mal compris et mal exécutés; ni les ouvriers ni même les patrons ne savent préparer leur travail par une épure. De ce fait, cette industrie reste sans avenir; elle se traîne. Elle se relèvera lorsque, dans les écoles primaires, les enfants auront appris, grâce au dessin géométrique, à faire un relevé géométral et à préparer complètement une exécution.

Ce que je dis pour la menuiserie s'étend à toutes les indu-

stries du bâtiment; ces industries pèchent par la préparation graphique des projets.

Les Arabes sentent bien leur infériorité à cet égard. C'est pourquoi des architectes indigènes, ayant dernièrement à construire un minaret important, aussi bien par ses dimensions que par sa décoration, en ont, au préalable, exécuté le dessin par plan, coupe et élévation.

L'essai était encore un peu naïf; il prouve néanmoins que l'enseignement du dessin technique sera bien accueilli par les praticiens indigènes et qu'il est désiré par eux; mais il faudra lui donner un caractère en rapport avec le génie de la race et avec les besoins bien reconnus du pays.

*Les bois tournés; tour rudimentaire.* — Il est fort amusant de voir, dans les souks, les tourneurs sur bois travailler avec le pied. Voici comment ils procèdent.

La pièce de bois (généralement c'est un bâton brut) est placée, très près du sol, entre deux pointes de fer sur lesquelles elle devra tourner et qui lui serviront de pivots. L'une des pointes est fixe et le bâton vient s'y appuyer par une de ses extrémités; l'autre pointe, grâce à un levier sur lequel agit la main gauche de l'ouvrier, est pressée légèrement sur l'autre bout du bâton.

Avant de caler la pièce de bois entre les deux pointes, le tourneur a rapidement enroulé sur son extrémité de droite la corde d'un archet. La main droite tient cet archet et lui imprime un mouvement de va-et-vient qui, par l'intermédiaire de la corde, donne à la pièce de bois un mouvement de rotation alternatif. Les deux mains sont donc occupées, l'une à serrer les pointes, l'autre à faire mouvoir l'archet, et ce sont les pieds qui tiennent le ciseau ou la gouge destinés à couper le bois.

Le procédé est barbare puisque, d'une part, ce sont les mains qui font la partie grossière du travail, tandis que les pieds accomplissent ce qui est délicat et que, d'autre part, les yeux sont très éloignés de la pièce à travailler. Mais les ouvriers sont habiles et je ne mets pas en doute que, avec des tours à la française, ils ne puissent faire de très jolis ouvrages.

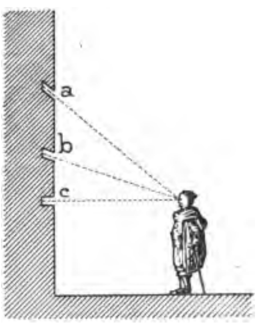
*Panneaux en éléments de bois tournés.* — Le tourneur, opérant comme il est dit ci-dessus, débite, à sa fantaisie, dans un bâton de bois, de petits morceaux tournés ayant de $10^{mm}$ à $15^{mm}$ dans leur plus grande dimension. Les uns sont à profil circulaire, les autres à profils en doucine, en talon, etc... Tous ces morceaux de bois sont percés, suivant leur axe, d'un conduit central de $2^{mm}$ environ de diamètre.

D'autre part, on a fait de petits cubes qui, eux aussi, sont percés, mais de deux trous, à angle droit. On enfile ces éléments sur des fils de fer qui se croisent dans l'intérieur des cubes et l'on obtient ainsi des grillages d'un aspect très satisfaisant.

## 6. — Plâtres ciselés, dits Nakch-Hadida.

*Le procédé.* — Sur des surfaces en plâtre mort [1] l'artiste (le traceur) dessine au compas et à la règle des combinaisons géométriques, décoratives, souvent extraordinaires. Après

Fig. 4.




quoi, ses aides, armés d'un étroit ciseau de menuisier, cisèlent et creusent le plâtre entre les lignes, à des profondeurs atteignant de $6^{cm}$ à $10^{cm}$.

---

[1] On désigne ainsi du plâtre éventé qui fait avec l'eau une prise incomplète et qui, ne devenant jamais très dur, se prête pendant longtemps au travail de ciselure.

La pente de ces entailles est, en général, plus grande en *a* (*fig.* 4), à la partie supérieure, celle qui est située au-dessus des yeux, qu'elle ne l'est pour les entailles placées plus bas, en *b* ou en *c*, par exemple. De cette façon, le rayon visuel d'un spectateur placé à moyenne distance voit chacune des entailles dans toute sa profondeur.

J'insiste sur ce détail pour montrer que les artistes tunisiens ont le sentiment des effets perspectifs et que, à l'exemple des Grecs de l'antiquité, ils en tiennent compte dans l'exécution.

*Les tracés.* — Les combinaisons géométriques imaginées par les traceurs sont véritablement très belles quoique très extraordinaires. Elles sont compliquées et, cependant, elles ne sont pas diffuses; elles accusent, toutes, un parti de composition très frappant et très net que des détails infinis viennent agrémenter, sans le faire disparaître. On donne aux traceurs une surface quelconque, plane, sphérique ou autre, limitée d'une façon plus ou moins simple et, sans commettre une seule erreur, sans se reprendre, ils combinent des polygones qui se ferment rigoureusement, qui s'enchevêtrent et se retournent gracieusement et qui, en fin de compte, couvrent cette surface d'un réseau, presque mystérieux, qui vous captive.

*Prix de revient.* — Il existe encore à Tunis deux ou trois artistes capables d'inventer et d'exécuter ces prodigieuses combinaisons. Si l'on se rapporte aux prix payés pour les beaux plâtres ciselés exécutés récemment au Bardo, cela reviendrait, *aujourd'hui*, excessivement cher. La profusion de ces ornements dans les anciens édifices prouve, cependant, qu'il ne devait pas en être ainsi autrefois. Mais, au Bardo, on travaillait pour le gouvernement du Bey, et l'on cherchait à réaliser des merveilles, ce qui explique cette cherté. Des architectes [1] qui en ont fait exécuter pour des particuliers, et M. le Directeur du Collège Alaoui, qui en a fait ciseler aussi pour le musée de cet établissement, affirment, au contraire, que les prix qu'ils ont payés n'ont rien eu d'exagéré.

---

[1] Entre autres, M. *Pétrus Maillet*.

*Possibilité d'application et d'exportation.* — Quoi qu'il en soit, tout en reconnaissant que ces décorations très fragiles, faites sur plâtre, ne peuvent être exécutées que sur place et ne supporteraient pas le transport, je me demande s'il ne serait pas possible d'en prendre des empreintes et de les réaliser, ensuite, en faïence ou en porcelaine. Dans ces conditions, les quelques artistes tunisiens qui ont conservé la tradition pourraient s'utiliser à créer des maquettes dont s'empareraient les céramistes. Les industriels français qui entreraient dans cette voie devraient se contenter de donner aux artistes tunisiens la figure et les dimensions des panneaux à orner; ils devraient ensuite s'en rapporter complètement à eux pour le détail de la composition, car ma conviction intime est que personne en France (si ce n'est peut-être le savant Artiste, auteur de l'*Art arabe*) ne possède aussi bien qu'eux la clé de ces combinaisons.

## CHAPITRE II. — LES INDUSTRIES D'ART A NABEUL.

### 1. — Situation de la ville; ses industries.

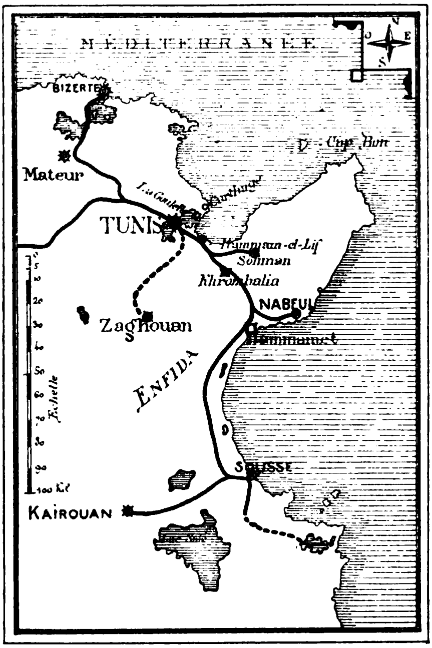
Nabeul est une ville de 8000 habitants, située sur la côte est du cap Bon, à $70^{km}$ environ de Tunis (voir *fig.* 5). La fertilité du sol y est extrême; elle est entourée de jardins très florissants.

Ses industries principales sont les poteries, les sparteries, les tissus et les broderies. Ces deux dernières sont peu importantes; elles existent là comme dans presque toutes les villes arabes; je n'en parlerai pas.

M. *Resplandy,* architecte du gouvernement de la Régence, avait tenu à faire avec moi la visite de Nabeul. Il s'intéresse vivement aux progrès de la céramique en Tunisie. Aussitôt que l'industrie locale sera capable de lui fournir, d'une manière certaine, de bons produits, il les emploiera très largement dans ses constructions. Les industriels trouveront en lui un guide artistique aussi sûr que bienveillant. Nous avons été reçus et guidés à Nabeul par M. *Debon,* directeur de l'École primaire,

auteur d'un Mémoire à la fois statistique et technique sur l'industrie des poteries dans cette ville. La plupart des détails qui

Fig. 5.




suivent m'ont été fournis par lui et je tiens à le remercier, ici, de son obligeance.

## 2. — L'industrie des poteries, à Nabeul.

*Fabrication actuelle.* — Il existe, à Nabeul, 45 ou 50 ateliers de potiers, chacun d'eux comprenant, en outre du patron, deux ou trois ouvriers et quelques apprentis. Souvent, plusieurs potiers se groupent autour d'un même four, dans lequel ils cuisent à tour de rôle.

On fabrique, surtout, des vases d'usage domestique, tels que : casseroles à couscous, gargoulettes ou carafes poreuses

dites encore *alcarazas*, aux formes et aux dispositions les plus curieuses, tasses à boire, amphores pour loger l'huile, flambeaux, tambourins, etc.

Ces poteries sont généralement brutes, c'est-à-dire sans émail, et poreuses. La terre est d'excellente qualité; sa plasticité est remarquable. On cuit au bois, dans des fours cylindro-sphériques presque complètement enterrés, afin d'éviter les déperditions de chaleur. Ces fours sont à deux étages.

La couverte émaillée, quand elle existe, est exclusivement jaune, verte ou brune; elle se vitrifie en seconde cuisson.

Les potiers de Nabeul ne connaissent plus ni les émaux blancs, ni ceux d'une couleur autre que les précédentes, et ils le regrettent beaucoup.

Ces potiers sont d'une rare habileté pour le tournage (ébauchage) des pièces. Ils semblent avoir hérité des anciens artistes de l'antiquité, et les formes rappelant beaucoup celles des vases grecs prennent, tout naturellement, naissance sous leurs doigts lorsqu'on ne vient pas violenter leur goût.

La grande île de *Djerba*, située à 250$^{km}$ au sud environ de Nabeul, a été de tout temps, elle aussi, un centre céramique important. On y fabrique, entre autres, d'énormes amphores à huile cubant plus de 300 litres; ce sont de magnifiques pièces faisant honneur à la fabrication de cette île.

*Fabrication ancienne.* — Les vieilles poteries de Nabeul étaient supérieures aux modernes. On en peut voir des spécimens chez quelques marchands de curiosités dans les souks de Tunis.

M. *B. Buisson* a réuni une collection de poteries modernes de Nabeul au Collège Alaoui dont il est le directeur, et M. *Roy*, Secrétaire général du Gouvernement tunisien, a groupé des échantillons de poteries anciennes et modernes au Dal-el-Bey (palais du Gouvernement).

*Progrès à réaliser.* — Ce qui manque aux potiers de Nabeul, pour égaler leurs devanciers, c'est la connaissance de quelques matières premières (particulièrement des émaux blancs ou colorés) et celle de quelques procédés techniques

perfectionnés. Mais ils ont conservé le secret des belles formes et l'habileté de main ; c'est le principal ; il sera possible de leur procurer ce qui leur manque et de rendre plus prospère encore que par le passé leur belle industrie. Mais, pour cela, il ne faudra ni fausser ni violenter leurs qualités naturelles et bien se garder de leur imposer des modèles, des décorations et des couleurs en opposition avec leur génie. J'essaierai de démontrer cela dans la seconde Partie de mon travail.

### 3. — L'industrie de la sparterie, à Nabeul.

*Nattes en jonc.* — On fabrique à Nabeul des nattes en jonc et des nattes en alfa. Il existe un assez grand nombre de petites fabriques comprenant, elles aussi, un patron, deux ou trois ouvriers et des apprentis.

Ces nattes sont de véritables tissus dans lesquels la chaîne est formée par des fils très forts ou par de petites cordes, tandis que la trame est constituée par des fibres végétales de jonc ou d'alfa. Ces fibres sont souvent colorées (vert, rouge, violet, noir, etc.) et les ouvriers, en combinant les fibres naturelles avec les fibres colorées, obtiennent ainsi les dessins les plus variés.

Ils sont d'une grande dextérité ; ils travaillent accroupis, la chaîne étant tendue horizontalement devant eux à quelques centimètres de terre ; c'est avec leurs doigts qu'ils font passer les fibres de la trame entre les fils de la chaîne, les doigts jouant ici le même rôle que la navette dans un métier ordinaire.

*Nattes en alfa.* — Les nattes en alfa coûtent plus cher que celles en jonc. Cela tient, d'une part, à ce que l'alfa ne pousse pas abondamment à Nabeul, qu'il faut l'importer et, d'autre part, à ce que la fibre d'alfa étant plus ténue que le jonc, le travail est plus long à exécuter. Par contre, ces nattes sont plus épaisses que les autres, plus moelleuses et plus semblables à des tapis.

On se sert des unes et des autres pour garnir le sol et les murs des mosquées, des cafés et des maisons. Elles sont un objet de très grande consommation.

*Prix de revient, avenir.* — Le prix des nattes en jonc est très faible; il varie de $0^{fr},30$ à $0^{fr},40$ le mètre carré pour les plus ouvragées.

Je crois que les belles nattes de Nabeul pourraient parfaitement, étant donné leur bas prix, constituer un article d'exportation.

Sans aller jusqu'à Nabeul, on peut voir des spécimens de ces nattes dans un dépôt qui existe aux souks de Tunis. Le prix en est un peu plus élevé; très peu, car le transport à dos de chameau, de Nabeul à Tunis, est extrêmement économique.

## CHAPITRE III. — LES INDUSTRIES D'ART A KAÏROUAN.

Kaïrouan, la cité sainte (*voir* plus haut, *fig.* 5), est aussi une ville très industrielle et très commerçante. Ses souks sont le centre de fabrications renommées : babouches, gants pour frictions, vêtements, objets en cuivre repoussé, cardeuses pour la laine, etc. Mais la grande industrie de Kaïrouan est celle des tapis; c'est la seule que j'étudierai.

### 1. — L'industrie des tapis.

*Ouvrières en tapis.* — Il n'y a pas, Dieu merci! d'usine spéciale à Kaïrouan; ce sont les femmes, au nombre de 4000 ou 4500, m'a-t-on dit, qui les fabriquent chez elles afin de s'en faire un petit revenu. Le mari leur assure le vivre et le couvert et c'est à elles à faire des tapis pour se donner le superflu, bijoux, parfums, etc.

*Genre des tapis fabriqués.* — J'ai vu fabriquer deux genres de tapis : le *margoum* ou tapis tissé, et le *zerbia* ([1]) ou tapis à haute laine, à points noués; on fait beaucoup plus de ce dernier que de l'autre et il coûte moins cher.

---

([1]) Le *zerbia* est le tapis connu en Europe sous le nom de *kaïrouan*.

*Tapis margoum.* — Le margoum est un véritable tissu. Entre les fils d'une chaîne tendue verticalement, fils qui sont généralement en poil de chameau pour les beaux produits, l'ouvrière fait circuler des navettes qui déroulent et enchevêtrent des fils de laine de différentes couleurs. Elle peut obtenir ainsi des dessins agréables.

Le *margoum*, avons-nous dit, coûte assez cher, surtout parce que sa fabrication est lente; de plus, ses dessins ne sont pas très variés. Tout cela tient à ce que les métiers sont très rudimentaires; en les perfectionnant on pourrait améliorer singulièrement le prix de revient et augmenter le choix des modèles.

*Tapis zerbia. Procédés.* — Une chaîne en laine, en chanvre ou, mieux encore, en poil de chameau est enroulée sur un tambour qui n'est autre chose qu'une poutre de bois horizontale, à section rectangulaire, suspendue près du plafond de la chambre. Le bout inférieur de cette chaîne est fixé sur une autre poutre, semblable à la première, dont le poids, assez considérable, suffit à tendre les fils. La poutre inférieure pend ainsi à quelques centimètres du sol; ses extrémités sont maintenues entre deux rainures qui l'empêchent de tourner et il en est de même de la poutre supérieure. Au fur et à mesure que le tapis avancera on sortira les extrémités de chaque poutre hors de leurs rainures, on enroulera sur la poutre inférieure la partie du tapis qui vient d'être terminée et l'on déroulera, par en haut, une longueur équivalente de chaîne. Les fils de cette chaîne sont d'autant moins espacés que l'on veut obtenir un tapis plus fin.

Une, deux ou trois femmes (ce nombre varie suivant la largeur du tapis) sont accroupies près de la poutre inférieure; chacune d'elles a pour domaine de ses opérations une largeur de 1 mètre environ. Elles ont à leur portée des pelotes de laine de différentes couleurs qu'elles tiennent de la main droite; dans une de leurs mains, la gauche ordinairement, elles tiennent soit des ciseaux, soit une sorte de canif, destinés à couper le brin de laine.

Avec une dextérité remarquable, elles nouent de la main

gauche, sur *deux fils* de la chaîne, un fragment de fil de laine de la couleur voulue. La longueur de ce brin est calculée de telle sorte que le bout flottant, une fois le nœud fait, possède une longueur variant de $10^{mm}$ à $15^{mm}$ ou $20^{mm}$, suivant la *hauteur* de laine que doit posséder le tapis. Avec le canif, elles coupent ensuite, à la même longueur, la partie du fil tenant encore à la pelote.

Bien entendu, si pour une rangée d'ordre pair on a noué ensemble les fils de chaîne 1 avec 2, 3 avec 4, 5 avec 6, etc., pour la rangée suivante, d'ordre impair, on nouera 2 avec 3, 4 avec 5, 6 avec 7, etc., de façon à rendre les fils de chaîne solidaires les uns des autres.

Quand une rangée horizontale de nœuds est terminée, on la tasse, avec une sorte de peigne, sur la rangée précédente et l'on passe à la rangée suivante.

*Organisation d'un atelier.* — Toutes les femmes qui travaillent à un même tapis s'entendent et obéissent à celle qui est la plus habile pour concourir à l'exécution d'un dessin voulu. Je crois qu'elles opèrent *par points comptés;* je n'ai pas vu, comme à Aubusson, la moindre maquette, dessinée ou peinte, apparaître soit sur la chaîne, soit derrière elle, pour guider les noueuses dans le choix des couleurs.

Un même atelier de femmes fait pendant longtemps le même tapis; d'ailleurs, les Orientaux ne s'attachent pas à obtenir une régularité mathématique, et ils ont raison. Dès que les ouvrières ont fait une ou deux fois le même dessin, elles l'ont, en quelque sorte, dans la main, et c'est avec une rapidité et avec une sûreté étonnantes qu'elles font leurs points noués.

*Prix actuels.* — Les prix actuels sont assez élevés. Cela tient d'abord aux intermédiaires beaucoup trop multipliés et, aussi, aux droits trop élevés et trop nombreux qui, en Tunisie, frappaient, il y a peu de temps encore, toutes les transactions. Droit pour être vendue comme toison, droit après le lavage, droit après le peignage et après le filage, droit après la teinture, droit de vente une fois le tapis terminé, droit d'exportation et, enfin, droit d'entrée en France : telles étaient les

charges qui frappaient, et qui frappent peut-être encore, la laine depuis son passage du dos du mouton jusqu'au logis de l'acheteur.

*Décadence de cette industrie.* — Les tapis modernes, tout en valant presque les anciens comme dessin, leur sont très inférieurs comme qualité et sont de moins en moins recherchés. Les ouvrières qui les font sont aussi soigneuses et aussi habiles que par le passé, mais les couleurs qu'elles emploient sont criardes et peu solides. On pouvait laver les anciens tapis, même à l'eau de mer; leurs couleurs, loin de s'éteindre, semblaient se raviver. On possédait alors des rouges, des bleus et des verts merveilleux; aujourd'hui ce sont les vilains violets qui dominent. Rien qu'en frottant les tapis modernes avec du papier ils déteignent et, de plus, les laines se gâtent rapidement, se mangent aux vers ou se putréfient.

*Causes de cette décadence.* — Ces infériorités tiennent, d'une part, au mauvais lavage des laines et, d'autre part, à la mauvaise qualité des couleurs employées. Les intermédiaires ont inondé la place de couleurs à base d'aniline, généralement de fabrication allemande : ou bien elles sont mauvaises, ou bien les teinturiers indigènes ne savent pas les fixer ni les rendre inaltérables. Elles ont remplacé partout, à cause de leur bas prix, les belles et solides couleurs végétales que les anciens teinturiers savaient extraire des plantes de la région et savaient si bien employer. Les secrets de cette extraction et de cet emploi semblent ignorés des teinturiers actuels de Kaïrouan.

Cependant, M. *Henry*, qui était contrôleur de Kaïrouan lors de mon passage, m'a dit avoir fait des recherches et avoir retrouvé ces plantes colorantes. Sa qualité d'ingénieur, ancien élève de l'École Centrale, donne une importance particulière à son affirmation ainsi qu'au Mémoire adressé par lui, sur ce sujet, au gouvernement tunisien.

# DEUXIÈME PARTIE.

## PROPOSITIONS.

---

Après avoir exposé, tel que j'ai cru le reconnaître, l'état actuel des industries d'art que j'ai pu étudier dans la Régence, je vais essayer d'indiquer ce que l'on pourrait faire pour relever celles qui s'éteignent, pour développer et pour aider dans leurs débouchés celles qui sont encore prospères.

Les mesures que je proposerai viseraient :

1° L'*enseignement;*
2° Le *commerce* et l'*industrie*.

### CHAPITRE I. — MESURES TOUCHANT A L'ENSEIGNEMENT.

#### 1. — Faut-il créer une École spéciale?

*Son inutilité actuelle.* — Je me déclare, pour longtemps encore, opposé à la création à Tunis d'une grande école, qu'elle soit qualifiée comme on le voudra : École des Beaux-Arts, École des Arts décoratifs, École des Arts industriels.

D'abord je suis persuadé, parce que cela a été constaté ailleurs, que les indigènes ne la fréquenteraient pas ; elle servirait exclusivement aux Européens et, surtout, à ceux qui ne sont pas de nationalité française.

Si elle était fondée, son enseignement serait, inévitablement, calqué sur celui des écoles similaires de France ; on y établirait des cours de dessin et de modelage d'après l'antique et d'après nature, des cours d'architecture, de perspective, d'anatomie, d'histoire de l'art, de composition décorative, etc. Moins que personne je ne veux critiquer les Écoles de Beaux-

Arts que nous avons créées en France ni leurs très beaux et très fructueux programmes. Mais je ferai remarquer que ces créations n'ont réussi chez nous que dans certaines grandes villes, et qu'elles ont échoué dans d'autres, qui les avaient sollicitées un peu inconsidérément, peut-être.

Les écoles spéciales doivent, en effet, venir comme conséquences, et non comme préliminaires, de l'état artistique et de l'état industriel particuliers à une région; il leur faut des bases solides dans la population, dans les écoles situées au-dessous d'elles (qu'elles soient primaires ou autres), et dans les industries qui les entourent. En un mot, leur rôle doit être de diriger, tout en l'accélérant, un mouvement déjà très accusé.

En Tunisie il n'y a rien de cela. Je sais bien que beaucoup de personnes, venues d'Europe et de passage en Afrique, seraient enchantées d'apprendre ou de faire apprendre à leurs enfants le dessin, la peinture et d'autres arts, sans qu'il leur en coûtât rien. Mais de presque tous les enseignements que j'énumérais plus haut, l'ouvrier indigène n'a que faire; il s'en est passé alors que son art était à l'apogée; plusieurs parties de ces enseignements sont, en outre, contraires à sa tournure d'esprit et en opposition avec les préceptes de sa religion.

*Dépenses exagérées qu'elle entraînerait.* — Cette école coûterait fort cher à construire. Il faudrait, en effet, lui bâtir un édifice spécial et bien se garder de vouloir utiliser pour elle une maison qui, sous le prétexte que l'on serait en Afrique, serait plus ou moins mauresque. Ces appropriations n'ont jamais donné rien qui vaille.

Son budget annuel serait important, 25000$^{fr}$ au moins.

*Instabilité du personnel.* — Les professeurs de cette école viendraient de France avec l'intention bien arrêtée d'y retourner dès que l'occasion se présenterait. D'ailleurs, il a été reconnu dans des écoles placées sous des latitudes comparables à celle de Tunis, qu'au bout de deux ou trois ans, fatigué par le climat, le personnel verrait décroître son ardeur et ses forces.

Les artistes que l'on enverrait posséderaient, bien entendu, tous les diplômes institués depuis dix-huit ans chez nous; mais cela fera-t-il qu'ils se mettront au courant des procédés employés et des besoins manifestés par des industries très spéciales, réparties sur divers points du territoire et très éloignées les unes des autres?

Et puis, enfin, si l'on voulait donner une influence très directe sur les industries d'art à des artistes mal préparés par leurs études et par leurs goûts à s'abaisser jusqu'à l'analyse du côté technique de ces industries, n'y aurait-il pas lieu de craindre qu'ils ne voulussent imposer à la production artistique une voie qu'ils croiraient bonne, sans doute, mais qui serait en dehors et du génie de la race et des ressources aussi bien que des traditions du pays. Cela s'est vu et probablement se verrait encore; c'est un grand danger à éviter.

Que faut-il donc faire?

*Un atelier arabe.* — L'enseignement, pour venir en aide aux industries d'art, doit se conformer aux mœurs des ouvriers arabes.

Pour nous rendre compte de ce qu'il conviendrait de faire, pénétrons dans une de ces petites boutiques dont sont composés les souks.

L'atelier arabe est une famille, toujours peu nombreuse. Le chef y est entouré de ses fils; avec eux sont un ou deux ouvriers et de tout jeunes enfants qui, plus tard, deviendront des apprentis. Rarement plus de cinq ou six personnes sont dans cet atelier, qui sert aussi de magasin de vente. Les unes travaillent assises par terre; les autres sont dans une soupente à mi-hauteur du plafond; de tout petits enfants (j'en ai vu qui n'avaient pas cinq ans) s'occupent à de menues besognes qui leur rapportent un ou deux sous par semaine.

C'est à la fois un atelier et une école; l'apprentissage règne en maître dans cette organisation. Et que l'on ne s'imagine pas que tout ce monde flâne, malgré que nous soyons ici aux portes de l'Orient; loin de là; le travail est intense, intelligent et productif.

Le patron, dans un espace aussi restreint, a l'œil sur tout

son monde; il surveille et il conseille chacun; souvent il prend en main l'ouvrage et il montre comment on doit l'exécuter; il s'occupe à préparer le travail et, comme l'*Amin* des selliers dont je parlais plus haut, il compose et dessine des maquettes; entre temps, il est vendeur et répond aux clients.

Une fois entré comme apprenti ou comme ouvrier dans un pareil atelier, le jeune homme n'en sortira plus; il n'ira plus se compléter dans une école, qu'elle soit de jour ou qu'elle soit de soir. Il faudrait donc qu'il entrât dans l'atelier muni des notions artistiques, scientifiques et techniques nécessaires pour lui permettre de progresser dans sa profession, et, en retour, de la faire progresser elle-même. C'est donc à l'école primaire qu'il doit acquérir ces notions fondamentales; c'est pourquoi je vais étudier ce que l'on pourrait faire de ce côté.

### 2. — État actuel de l'enseignement technique à l'école primaire.

*Constatations faites au concours agricole.* — Le concours agricole, qui se tenait à Tunis lors de mon séjour, comportait une admirable exposition de l'Enseignement public; admirable si l'on songe, surtout, qu'il y a quatorze ans à peine, il n'existait presque rien.

Aujourd'hui l'enseignement primaire, dans la Régence, est au même niveau que dans la plupart des départements français. C'est avec amour et avec respect que le plus humble des Arabes prononce le nom de l'honorable Directeur de l'enseignement public, de M. *Machuel,* car il sait que le pays lui doit de tels résultats. Il associe à ce nom vénéré ceux de M. *Benjamin Buisson,* directeur du Collège *Alaoui,* et de M. *Delmas,* directeur du Collège *Sadiki,* car il n'ignore pas que ces trois hommes éminents l'aiment et consacrent à son perfectionnement intellectuel et moral toute leur force et tout leur dévouement.

D'ailleurs, ce qui frappe en Tunisie, c'est de voir avec quelle simplicité et avec quelle sûreté l'administration exécute les réformes, amène le progrès, organise des services qui, cepen-

dant, doivent être bien compliqués, si l'on en juge par ce qu'ils sont dans la métropole. On sent que chaque Directeur de service, que chaque subordonné prend modèle sur le Chef suprême de l'administration et, comme lui, qu'il se donne tout entier. On ne sait ce qu'il faut le plus admirer du service des postes ou du service topographique; de l'organisation de l'instruction publique ou de celle des recherches archéologiques; du service des travaux publics ou de celui du commerce, de l'agriculture et des contrôles civils.

Pour en revenir au concours agricole, je me suis attaché surtout à examiner les résultats de l'enseignement du dessin, car il est considéré, à juste titre, par toutes les personnes compétentes, comme la base de toute éducation technique.

Beaucoup d'écoles primaires de garçons ou de filles, laïques ou congréganistes, françaises ou italiennes, catholiques, protestantes, musulmanes ou israélites, avaient alors exposé des dessins et des travaux manuels. Ces travaux d'élèves étaient intéressants et, presque tous, surtout dans les écoles laïques, ils étaient exécutés d'après les programmmes officiels français. Est-ce bien cela qu'il convient de faire? Je vais m'expliquer tout à l'heure sur ce point. Pour l'instant, l'inspection détaillée que j'ai faite au Collège Alaoui et au Collège Sadiki qui sont, on le sait, les grandes écoles primaires supérieures de la Régence, ainsi que les résultats que j'ai observés à l'exposition du concours agricole, me donnent la conviction que les élèves indigènes ne sont pas rebelles, loin de là, aux études graphiques; c'était là le point important à constater [1].

Maintenant, convient-il, dans ce pays du soleil et de la couleur, dans lequel la religion défend la représentation de tout être animé, qui, à cause de cela, n'a jamais eu et n'aura jamais de peintres ni de sculpteurs, dont les industries d'art sont presque exclusivement limitées à celles dans lesquelles on se propose de décorer des surfaces, convient-il, dis-je, de faire travailler les jeunes Arabes rigoureusement d'après les mêmes

---

[1] Mes éminents collègues, M. *Henry Havard* et M. *Paùl Colin*, ont fait la même constatation en Algérie.

méthodes que celles que l'on impose aux jeunes Français? Je ne le crois pas.

### 3. — Ce que pourrait être l'enseignement du dessin à l'école primaire.

*Quelques mots sur les programmes officiels français.* — En introduisant le dessin dans l'enseignement primaire et en le rendant obligatoire en France, on a tout d'abord obéi à cette pensée que le sens de la vue avait droit à être formé avec autant de soin, si ce n'est plus, que les autres. Apprendre à dessiner, a-t-on dit, c'est apprendre à voir, et, c'est surtout apprendre à observer. L'acte matériel qui consiste à traduire par un trait et par des ombres les objets que l'on a vus, n'est que la sanction d'une observation qui a été méthodique, intense et complète. L'habileté de main est secondaire et, sauf des exceptions pour les enfants infirmes, elle est toujours la conséquence d'une observation bien conduite.

C'est dans cet esprit qu'ont été conçus les programmes de l'enseignement primaire du dessin, programmes qui donnent de merveilleux résultats lorsqu'ils sont appliqués par des instituteurs qui en ont compris la philosophie.

Ce n'est pas ici le lieu d'expliquer ces programmes. Je dirai seulement que, dans une première partie des études, on veut mettre l'élève en possession des deux dimensions et que, sous forme de modèles méthodiquement choisis, on lui fait observer, afin de les reproduire ensuite, des figures sans profondeur. Il y a là, déjà, un champ très vaste d'observation et de nombreuses occasions de faire copier aux enfants de jolis motifs de décorations de surfaces planes.

Plus tard, dans une seconde partie, on aborde la troisième dimension; les modèles deviennent alors des figures en relief, des solides géométriques simples, des objets usuels, des fragments d'architecture; successivement on fait reproduire ces modèles en relief *géométralement,* c'est-à-dire dans leurs proportions vraies, et *perspectivement,* c'est-à-dire dans leurs proportions apparentes.

Quand cette seconde partie des programmes est épuisée, on considère que l'élève *sait comment on doit voir* et qu'il possède les *éléments de la science du dessin;* c'est cela que ceux qui ont pour mission d'instruire la jeunesse considèrent comme étant le minimum que l'on doit à tous, et c'est à ce titre que cela constitue la *partie primaire* de l'enseignement du dessin.

*Comment appliquer ces programmes en Tunisie.* — Dans les écoles primaires de Tunisie, jusqu'à nouvel ordre du moins, on pourrait se contenter de la première partie déjà bien assez difficile à enseigner méthodiquement. Lorsque, après avoir franchi les premiers degrés, on arriverait à faire observer, pour les reproduire ensuite à vue et de mémoire, des modèles à deux dimensions, on n'aurait qu'à puiser dans l'art décoratif indigène pour faire un choix de motifs rendant cet enseignement à la fois attrayant pour le présent, et utile pour l'avenir. Dans la seconde partie, on laisserait de côté la représentation perspective pour appuyer presque exclusivement sur la représentation géométrale, ainsi que sur le dessin géométrique proprement dit.

*Dessin géométrique.* — On développerait l'enseignement de ce dernier plus, peut-être, qu'il ne l'est dans la métropole, car jamais, pour l'instant du moins, l'apprenti tunisien, une fois sorti de l'école primaire, n'en verra faire l'application dans les ateliers, comme il le verrait faire s'il était en France. On enseignerait aux enfants les principaux tracés géométriques et, surtout, on les exercerait au relevé géométral. L'élève devrait sortir de l'école non seulement avec une certaine expérience des relevés, mais, surtout, avec cette idée que l'exécution matérielle d'un objet, que ce soit un édifice ou toute autre chose, doit être précédée du dessin géométral de cet objet; que c'est la seule manière de préparer un travail sérieux; qu'elle entraîne avec elle économie de temps et économie d'argent; qu'elle empêche le gaspillage de matières souvent précieuses.

*Notions de sciences appliquées.* — J'ai interrogé, sur les sciences, quelques élèves indigènes du Collège Sadiki; j'ai été frappé de la netteté de leurs réponses comme aussi de la concision avec laquelle elles étaient, fort correctement d'ailleurs, exprimées en langue française. Ces questions étaient d'un ordre relativement élevé, puisque le Collège Sadiki est une école supérieure. Dans les écoles primaires ordinaires on donne aussi des notions de sciences.

Or, ne pourrait-on pas, dans toutes ces écoles, sortir un peu des manuels tout faits, passer légèrement sur les généralités trop théoriques et viser le plus possible les applications aux industries locales?

Par exemple, à Nabeul, si l'on parle de Chimie ou de Physique, ne pourrait-on pas insister sur les propriétés des argiles et sur celles des silicates? sur le rôle des oxydes métalliques destinés à colorer les couvertes? sur les fours et sur les combustibles, etc., etc.?

A Kaïrouan, on parlerait du lavage des laines et des procédés de teinture; on décrirait de bons métiers et de bonnes peigneuses; on donnerait le principe des métiers Jacquart.

### 4. — Rôle des livres.

Le rôle du livre dans tout cela me semble devoir être prépondérant; sans le livre on n'obtiendra rien. D'abord il fera l'instruction de l'instituteur et ensuite, par transmission, celle de l'élève. De l'école il pénétrera dans la famille, et c'est de cette manière, seulement, qu'il atteindra la femme indigène.

Quatre ou cinq livres suffiraient; mais il faudrait les composer spécialement pour la Tunisie et même les traduire en arabe afin qu'ils puissent pénétrer fructueusement dans les familles. Il serait inutile de chercher ces livres dans les collections existantes, on ne les y trouverait pas.

Il faudrait d'abord un opuscule sur le dessin, ce serait le livre du maître, pour les instituteurs. Il y aurait aussi des petites brochures se rapportant aux principales industries; elles

trouveraient à être utilisées et répandues dans les centres où ces industries sont en faveur.

Je pense que si M. le Directeur de l'enseignement reconnaissait l'utilité de ces livres, il pourrait tout d'abord, comme M. *Debon* l'a si bien fait à Nabeul pour l'industrie céramique, faire faire par les instituteurs, sous la direction et sous le contrôle de MM. les Inspecteurs primaires, une enquête sur les industries de chaque localité; après quoi, avec la connaissance profonde qu'il possède du caractère et des habitudes des Arabes, il tracerait les grandes lignes du programme de chacun de ces livres et indiquerait l'esprit dans lequel ils devraient être composés.

Je suis absolument convaincu que, sur ces indications, qui seraient forcément très précises, il se trouverait en France des personnes disposées à se réunir pour chercher à réaliser les désiderata de M. *Machuel.*

La dépense serait insignifiante.

## CHAPITRE II. — MESURES TOUCHANT AU COMMERCE ET A L'INDUSTRIE.

### 1. — Mesures d'ordre technique.

*Leur urgence.* — Les propositions relatives à l'enseignement, que je viens d'indiquer ci-dessus, auraient comme effet de verser dans l'industrie des apprentis relativement instruits. Ces apprentis posséderaient des notions de sciences et de dessin qui leur permettraient de devenir, plus tard, des ouvriers d'élite, capables un jour de relever le niveau artistique et technique de leur profession.

Mais cela demanderait du temps, et il ne faudrait pas que ces mesures fussent appelées à produire leur effet quand il serait trop tard, c'est-à-dire lorsque ces industries seraient mortes. Il est donc urgent, et je crois qu'il est possible, de prendre *immédiatement* des mesures, pour arrêter dans leur décadence professionnelle les deux industries principales : la céramique et la tapisserie.

Je crois avoir démontré que si leur niveau actuel est en baisse, elles le doivent à leur affaissement technique. Les céramistes ne savent plus fabriquer les émaux, les tapissiers ne savent plus nettoyer ni teindre leurs laines. Je crois que le Gouvernement pourrait, sans grandes dépenses, prendre les mesures suivantes :

*Céramique.* — 1° Faire venir de France les émaux dont le secret est perdu à Tunis et à Nabeul; confier ces émaux aux ouvriers les plus capables et leur faire faire des essais;

2° En ce qui touche les carreaux de revêtement, engager M. l'Architecte de la Régence à employer largement et exclusivement ceux de fabrication tunisienne;

3° D'une façon générale, confier à cet artiste la direction des essais conseillés ci-dessus ([1]).

4° Faire rédiger et faire traduire en arabe une Notice sur la fabrication des poteries et sur celle des carreaux; faire répandre largement cette Notice parmi les ouvriers, et surtout parmi leurs enfants, qui savent lire et qui l'expliqueront à leurs parents.

*Tapisseries.* — 1° Encourager pécuniairement à Kaïrouan la création d'une teinturerie modèle ou, mieux encore peut-être, donner des primes à ceux des ouvriers qui présenteraient des laines bien lavées, bien teintes et bien filées ;

2° Faire étudier le Mémoire de M. l'ex-contrôleur *Henry*, dont j'ai parlé ci-dessus; faire rechercher par le service de l'Agriculture les plantes tinctoriales dont parle ce Mémoire et faire encourager, par le même service, la culture de ces plantes;

3° Faire rédiger et faire traduire en arabe une Notice sur la

---

([1]) M. *Resplandy*, architecte de la Régence, d'accord avec M. le Directeur et avec M. le Sous-Directeur des travaux publics, est tout disposé à agir ainsi; plusieurs de ses confrères, architectes privés, sont dans le même cas. Mais, pour le moment, ce qui arrête ces messieurs, c'est l'impossibilité où ils sont de faire réaliser leurs conceptions par des ouvriers tunisiens. Lors des réparations du palais du Bardo, une grande partie des carreaux employés a été commandée à Desvres (Pas-de-Calais); n'est-ce pas regrettable?

teinture et sur la tapisserie, et la répandre largement dans les ménages où se fabriquent les tapis.

Ces mesures seraient complétées par la création des musées, dont je vais parler, pour finir.

## 2. — Musée central, à établir à Tunis.

Il est question de créer à Tunis un musée permanent des Beaux-Arts. Le succès des expositions temporaires ouvertes en 1895 et en 1896, fait préjuger que cette création, qui incomberait nécessairement à la Direction des Antiquités et Arts, serait fort appréciée de la population.

J'y applaudis de toutes mes forces, mais je désirerais qu'il lui fût annexé, avec une importance prépondérante, un *musée commercial d'Art industriel.*

Ce musée central comprendrait trois sections [1] :

Une section de Beaux-Arts,
Une section commerciale,
Une section d'Art industriel.

*Section de Beaux-Arts.* — Son organisation n'aurait rien de particulier; on y réunirait, comme dans les musées similaires, des dessins, des peintures et des sculptures. Ses locaux serviraient, jusqu'à nouvel ordre, aux expositions annuelles.

*Section commerciale.* — La section commerciale serait organisée en exposition permanente, mais *constamment renouvelable,* des produits d'arts décoratifs de *toute* la Régence.

A des époques fixes, par exemple tous les mois ou tous les quinze jours, les exposants auraient le droit de changer leurs produits.

Les objets exposés ne seraient reçus qu'après avoir passé

---

[1] *Voir* plus loin le projet d'un pareil musée. Ce projet est tout à fait idéal; je ne l'ai donné que pour fixer les idées, et pour permettre aux personnes compétentes de se rendre compte de la dépense qu'entraînerait sa création.

sous le contrôle d'une Commission permanente chargée d'administrer le musée.

Dans son appréciation, la Commission, faisant ainsi fonction de jury d'admission, commencerait d'abord par tenir compte de la valeur artistique des objets présentés et repousserait, mais sans parti pris de système, d'école ou de tendance, ce qui lui semblerait mauvais. En plus, et ce serait peut-être là son rôle le plus important et le plus délicat, elle s'assurerait de la sincérité des déclarations; elle garantirait que les produits ont été *réellement* fabriqués par ceux qui les exposent, et que les prix n'en sont ni exagérés ni avilis.

*Protection du fabricant direct.* — En effet, ce musée commercial aurait pour but principal de mettre les fabricants indigènes directement en rapport avec les acheteurs, de faire en sorte qu'ils ne soient plus, comme aujourd'hui, la proie d'intermédiaires avides qui s'enrichissent à leurs dépens et qui trompent les acheteurs, aussi bien sur la provenance que sur la valeur réelle des produits dont ils majorent exagérément les prix.

N'est-il pas avéré que dans les magasins de Tunis et de toute la Régence, si l'on paie un objet la moitié ou le tiers du prix demandé, on n'est pas encore certain d'avoir échappé à l'exploitation?

L'ouvrier indigène est absolument respectable et intéressant; notre devoir, puisque nous avons établi un protectorat, n'est-il pas de le protéger contre ceux qui seraient tentés d'abuser de lui?

Dans cette section commerciale, tous les prix seraient marqués en chiffres connus. Les objets pourraient être achetés et emportés immédiatement par les visiteurs; mais cette vente ne pourrait se faire que par l'intermédiaire d'un employé du musée et rigoureusement au prix marqué.

L'exposant ne serait pas présent; et le règlement porterait que si, dans son magasin ou dans son atelier de la ville, il vendait le même article à un prix inférieur à celui indiqué à l'exposition, il serait exclu du musée soit pour un temps, soit pour toujours.

*Section d'Art industriel.* — Cette section serait *propriétaire* de tous les objets qu'elle contiendrait. On ne verrait là que des pièces de très beau choix.

Les unes proviendraient de dons faits, soit par l'État, soit par des particuliers; elles seraient empruntées aux arts de toutes les époques et de tous les pays; néanmoins, l'art indigène y serait plus largement représenté que les autres.

Les autres pièces proviendraient d'achats faits périodiquement à la section commerciale. A cet effet, dès qu'une pièce de cette dernière section serait reconnue comme étant de qualité supérieure, elle serait achetée par la section d'Art industriel et prendrait place chez elle. Cette sélection de tous les instants serait une grande cause d'émulation entre les producteurs.

*Bibliothèque.* — Une bibliothèque de consultation et de prêts de livres ou de gravures serait annexée à ce triple musée. Elle fonctionnerait comme font si bien les bibliothèques d'art des mairies de Paris.

*Ressources budgétaires.* — L'entrée du musée ne serait pas gratuite; elle pourrait, sans exagération, être fixée à 1 franc. Les étrangers et les touristes, si nombreux à Tunis, surtout pendant l'hiver, y afflueront davantage s'il existe des tourniquets que si les portes sont privées de cette utile addition. Le musée commercial devant donner aux amateurs de grandes facilités pour acheter des souvenirs authentiques du pays, sans risquer d'être trompés, ne sera-t-il pas juste de leur faire payer ces avantages? On pourrait créer des cartes d'abonnement; ces cartes seraient délivrées gratuitement aux artistes, artisans ou ouvriers qui justifieraient de leur qualité. Le produit de ces entrées ainsi que celui des prélèvements (d'un tant pour 100, à fixer) sur les achats qui se feront par l'intermédiaire du musée commercial suffiront pour alimenter la caisse des acquisitions, aussi bien pour le musée d'*Art industriel* que pour celui de *Beaux-Arts*.

Il y aurait, en outre, un budget fixe pour les dépenses fixes, il pourrait être, je crois, de peu d'importance.

( *Voir* plus loin le projet de musée central.)

### 3. — Musées locaux.

Le musée central de Tunis recevrait les produits de *toute* la Régence, mais il aurait des succursales dans les principales villes industrielles.

Ces *musées locaux* seraient, provisoirement du moins, établis soit dans une des salles des bâtiments du contrôle, soit à la rigueur, dans l'école primaire. Ils ne renfermeraient que les produits de la ville ou de la région où ils seraient installés. A part cela, ils seraient organisés comme le musée central; ils comporteraient donc une *section commerciale,* avec produits *renouvelables* et susceptibles d'être vendus, et une section d'*Arts industriels* renfermant des produits de choix, appartenant à la section et *inaliénables*. Il est probable que, d'ici longtemps, la section de *Beaux-Arts* n'existerait pas; mais dans la section d'Arts industriels il y aurait des livres et des gravures susceptibles d'être consultés et même d'être emportés par les intéressés.

C'est ainsi qu'à *Kaïrouan* je voudrais voir figurer des planches du magnifique Ouvrage sur les tapis publié par l'Institut de Vienne, et d'autres du même genre, que l'on exposerait dans des cadres et que l'on renouvellerait souvent. Il y aurait des jours et des heures où l'entrée serait exclusivement réservée aux femmes indigènes, surtout à celles qui fabriquent des tapis.

Ces musées locaux, eux aussi, seraient payants et faciliteraient, moyennant un certain droit, les achats directs aux producteurs.

## Annexe n° 1.

## PROJET DE MUSÉE CENTRAL (*fig.* 6).

Je donne ce projet à titre de simple indication et simplement pour préciser ma pensée.

*Musée de Beaux-Arts.*— Le musée de Peinture serait au centre des bâtiments, dans une sorte de cour éclairée par le plafond. Il serait compris entre des murs très épais, percés de deux portes seulement que l'on garnirait de doubles vantaux en tôle; de cette façon les chances d'incendie seraient aussi atténuées que possible. Il occuperait à la fois la hauteur du rez-de-chaussée et celle du premier étage. Il serait divisé en trois travées que l'on pourrait, plus tard, si le musée s'enrichissait de toiles nombreuses, séparer par des cloisons, afin d'augmenter les surfaces murales. Dans ces salles seraient placées quelques sculptures, mais les principales d'entre elles seraient disposées en partie dans le vestibule du rez-de-chaussée et dans celui du premier étage, en partie sur la terrasse, garnie d'une treille, qui couronnerait l'édifice.

*Musée commercial.* — Le musée commercial serait installé dans deux grandes galeries latérales, au rez-de-chaussée.

Ce rez-de-chaussée comprendrait également un logement de concierge, une bibliothèque et des services administratifs.

Afin d'augmenter les surfaces murales dans les deux galeries, on y établirait, en menuiserie, des sortes de boxes mobiles.

Un large escalier conduirait au premier étage et même à la terrasse.

*Musée d'Art industriel.* — Le musée d'Art industriel serait organisé au premier étage dans deux grandes galeries latérales situées au-dessus de celles du musée commercial.

Une loggia pourrait s'ouvrir entre le vestibule du premier

étage et le musée de Peinture. Dans le cas où le musée central servirait pour des fêtes, un orchestre pourrait être installé dans une partie de ce vestibule, de manière à être entendu de la salle de Peinture.

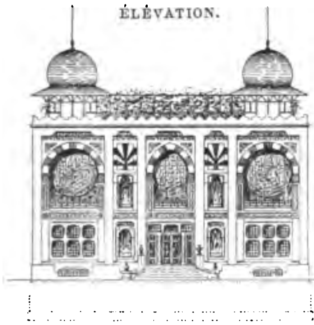
*Musée agricole.* — Dans les galeries latérales du sous-sol, on pourrait organiser un musée de produits agricoles. Le dessous de la salle de Peinture servirait de dépôt ; on y installerait aussi le calorifère.

Comme construction, ce bâtiment pourrait très économiquement être fait en ciment armé. Inutile de dire que la décoration par carreaux céramiques devrait y jouer un rôle prépondérant et qu'elle accompagnerait fort bien l'architecture arabe, à laquelle le style de l'édifice serait emprunté.

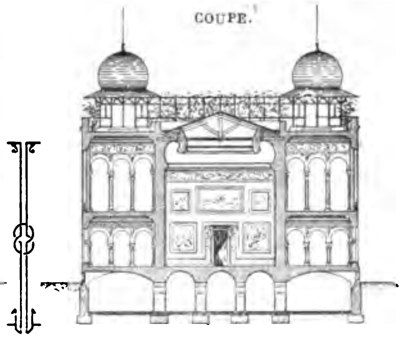
Je crois qu'un musée multiple, compris comme je viens de l'indiquer, rendrait les plus grands services. Je voudrais surtout, en présentant ce projet, détourner l'Administration de l'idée d'utiliser comme musée un édifice quelconque que l'on approprierait tant bien que mal. Ces adaptations n'ont jamais donné de bons résultats et elles ont toujours coûté fort cher.

Fig. 6.

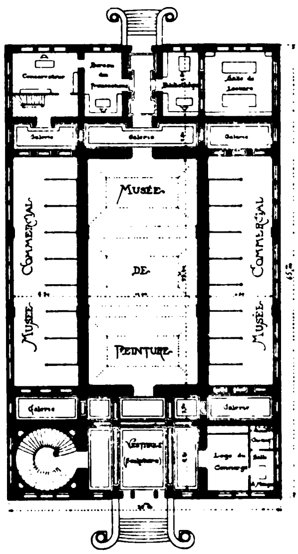
ÉLÉVATION.



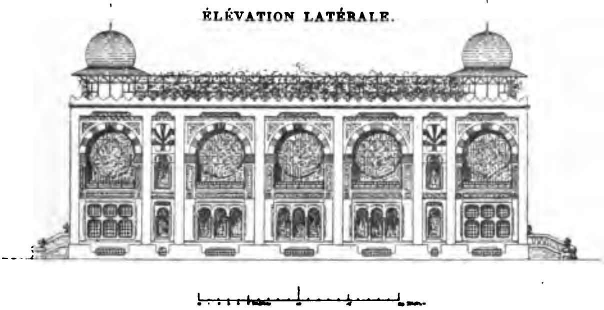
COUPE.



PLAN.




ÉLÉVATION LATÉRALE.



## Annexe n° 2.

## CRÉATION D'UN OBSERVATOIRE ASTRONOMIQUE A TUNIS.

L'objet de la Note qui précède est, on l'a compris, de solliciter le relèvement d'industries d'art que les Arabes avaient su, dans les temps passés, rendre florissantes. Mais, s'ils ont été jadis très brillants dans les Arts décoratifs, ils n'ont pas été moins remarquables dans les Sciences exactes et particulièrement en Astronomie. Je demande aux lecteurs la permission de terminer cette communication en reproduisant, textuellement, les propositions que le Colonel *Laussedat,* Membre de l'Institut, Directeur du Conservatoire des Arts et Métiers, a faites au Congrès d'Oran et a renouvelées à celui de Carthage, relativement à la création d'un observatoire astronomique à Tunis. Peut-être contribuerai-je ainsi, et j'en serais heureux et fier, à créer un courant d'opinions en faveur de sa très utile et très patriotique proposition :

*Association Française pour l'avancement des Sciences.*
*Congrès de Carthage* (avril 1896).

### Note présentée au nom de M. Laussedat (1).

En 1888, après la session du Congrès de l'Association française à Oran, que j'avais eu l'honneur de présider, j'étais allé à Alger avec l'intention de visiter l'observatoire de la Bouzaréa et de conférer avec son savant Directeur, M. *Trépied,* sur l'utilité de la création d'un autre observatoire à Tunis.

J'ai toujours pensé qu'il serait à souhaiter que la France s'efforçât de faire renaître le culte de la Science dans les pays

(1) Cette Note, présentée à la première Section, et soutenue par M. É. Levasseur à l'Assemblée générale du Congrès de l'Association française pour l'avancement des Sciences à Tunis, a été l'objet d'un vœu transmis au Ministre de l'Instruction publique et des Beaux-Arts.

où elle a été longtemps en honneur. Il serait d'ailleurs fâcheux pour notre considération de paraître aux yeux des étrangers, et particulièrement des Anglais et des Italiens, indifférents aux ressources d'un climat merveilleux pour l'étude de l'Astronomie.

D'un autre côté, en améliorant le port de Tunis et en créant celui de Bizerte, nous avons eu sans doute la prétention de déterminer un sérieux mouvement commercial sur cette partie des côtes de la Méditerranée placée sous notre protectorat. N'est-il pas naturel, dès lors, d'établir un observatoire astronomique dans le voisinage de ces ports pour y envoyer télégraphiquement l'heure, chaque jour, aux marins?

M. *Trépied,* à qui j'exposai ces motifs et qui les apprécia fort, ne manqua pas d'insister, en outre, sur ce que la latitude de Tunis étant sensiblement la même que celle d'Alger, il serait tout à fait désirable d'avoir ainsi deux stations astronomiques (reliées télégraphiquement) qui se compléteraient, le ciel pouvant être couvert à Alger tandis qu'il est découvert à Tunis et réciproquement. Les travaux entrepris dans l'une comme dans l'autre marcheraient plus vite, en se contrôlant mutuellement. Ce ne serait assurément pas trop, en effet, de deux observatoires à la latitude de 36°, alors qu'il en existe un si grand nombre en Europe et en Amérique aux latitudes supérieures, qui explorent les mêmes zones célestes.

Après cette sorte d'enquête qui m'avait confirmé dans mes idées et jusque dans mes pressentiments, j'allais à Tunis et j'essayais d'intéresser notre Résident général à un projet qu'il sembla goûter, tout en faisant des réserves sur la participation du Gouvernement Beylical.

Rentré en France, j'obtins une audience de M. le Ministre des Affaires étrangères, qui m'engagea à adresser à son collègue de l'Instruction publique une note et un devis. Quelques mois après, ce dernier me répondait que les ressources budgétaires de la Régence ne permettaient pas de donner une suite immédiate à mon projet.

J'allai voir un peu plus tard l'Amiral *Mouchez* pour l'entretenir de mes projets et de leur peu de succès. L'excellent Directeur de l'Observatoire de Paris m'avait aussitôt déclaré que,

non seulement il s'associerait à tout ce que je tenterais encore pour atteindre le but que j'avais en vue, mais qu'il profiterait d'un prochain voyage à Tunis pour voir, à son tour, les personnages influents qui pourraient nous aider à réussir et pour se rendre compte des conditions plus ou moins favorables des emplacements que j'avais cherchés pour y installer l'observatoire et que je lui avais signalés.

Je crois que l'Amiral a fait ce voyage, mais je ne connais pas le résultat de ses investigations, la mort l'ayant atteint assez peu de temps après son retour.

Je comptais, en allant cette année au Congrès de Carthage, donner ces détails, puis, après avoir exposé l'économie du projet, demander à mes collègues le secours de leurs lumières pour le modifier et leur concours pour le faire aboutir.

Obligé, bien malgré moi, de renoncer à m'absenter de Paris en ce moment, je dois me contenter d'appeler leur attention sur une question à laquelle plusieurs d'entre eux, je l'espère, voudront bien s'intéresser, et je termine cette Note en les priant d'émettre le vœu que « dans l'intérêt de la Science, dans l'intérêt de la France et dans celui du pays placé sous son protectorat, il soit créé aux environs de Tunis un observatoire astronomique sous le haut patronage de S. A. le Bey ».

## *Éléments du projet.*

*Emplacement de l'Observatoire.* — On pourrait choisir entre les trois points suivants ([1]) :

Le sommet du Djebel-Merkez coté 153, à $4^{km}$ de Tunis;

Le sommet du Djebel-Naali coté 240, à $7^{km}$ ;

Enfin le sommet du Djebel-Khaoui coté 105 et très voisin de la résidence de la Marsa.

L'examen très rapide que j'ai pu faire en 1888 de ces emplacements ne m'a pas permis d'arrêter mon choix, et c'est l'une des questions que j'avais espéré éclaircir en allant cette année à Tunis.

---

([1]) *Voir* la Carte à l'échelle de $\frac{1}{40000}$ des environs de Tunis et de Carthage, du Service géographique de l'Armée.

*Évaluation approchée de la dépense.* — Par comparaison avec d'autres installations analogues à celle dont je conseillerais de se contenter, au moins actuellement, j'estime la dépense à prévoir de la manière suivante :

| | |
|---|---|
| Bâtiments comprenant : 1° les logements d'un astronome marié, d'un assistant et d'un concierge ; 2° les édifices pour abriter les instruments et les cabinets de travail ainsi qu'une bibliothèque......... | 100 000fr |
| Instruments d'observation composés d'un cercle méridien, d'un équatorial de six à huit pouces, d'un théodolite, d'une horloge astronomique, de deux chronomètres et d'instruments météorologiques................................ | 50 000 |
| Fils électriques (somme à fixer). | |
| Total...... | 150 000fr |

Traitements annuels des trois personnes ci-dessus désignées, savoir :

| | |
|---|---|
| L'astronome titulaire.................................. | 8 000fr |
| L'assistant........................................... | 3 500 |
| Le concierge.......................................... | 1 500 |
| Entretien des bâtiments, d'un jardin, des instruments, chauffage et éclairage........................................ | 7 000 |
| Total...... | 20 000fr |

# TABLE DES MATIÈRES

## DU MÉMOIRE DE M. J. PILLET.



## PREMIÈRE PARTIE.

### CONSTATATIONS.



## DEUXIÈME PARTIE.

### PROPOSITIONS.





# L'ACIDE NITRIQUE

DANS

# LES EAUX DE RIVIÈRE ET DE SOURCE,

Par M. Th. SCHLŒSING,
Professeur au Conservatoire des Arts et Métiers.

C'est une question très intéressante pour les agriculteurs que celle de savoir combien une terre végétale lavée par les infiltrations des pluies perd d'azote assimilable, au cours d'une année. On est tenté de la résoudre en prenant pour base de calcul les proportions d'acide nitrique trouvées par divers observateurs dans les eaux de drainage; mais il y a des raisons de penser que ces proportions, mesurées dans des cas particuliers où la nitrification prend une activité inusitée, conduiraient à une évaluation exagérée.

Il m'a paru possible d'obtenir une évaluation plus sûre en mesurant l'azote perdu, non par des surfaces très limitées, comme celles de champs drainés, mais par une vaste étendue de territoire, par exemple celle du bassin entier d'une rivière. Les cours d'eau sont les drains naturels où aboutissent les eaux infiltrées dans leurs bassins; doser l'acide nitrique dans un cours d'eau, c'est le doser dans l'ensemble des eaux de drainage de son bassin; c'est mesurer la perte d'azote subie par une superficie de terrain très étendue, de laquelle se déduit la perte moyenne par unité de surface.

Mais il faut choisir pour une semblable étude l'occasion où une rivière est exclusivement alimentée d'eaux souterraines, exemptes de toute altération. Cette occasion s'est présentée

au mois de février 1895, pendant que régnait un froid rigoureux qui avait suspendu tout apport d'eau de ruissellement et toute consommation de nitrates par la végétation aquatique. Je me suis empressé de la saisir, et j'ai dosé alors l'acide nitrique dans les eaux de la Seine, de l'Yonne, de la Marne, de l'Oise.

Ce premier travail en a amorcé un deuxième, dans lequel je me suis proposé de suivre, pendant une année, les variations de l'acide nitrique dans la Seine et ses trois principaux affluents, afin d'acquérir sur le *régime nitrique* des rivières des notions que n'ont pu fournir jusqu'ici des dosages isolés faits dans diverses eaux, à des dates quelconques.

En même temps, j'ai déterminé l'acide nitrique dans les eaux de source dérivées à Paris; et cette recherche n'a pas tardé à prendre un intérêt tout spécial que je ne soupçonnais pas à son début : des différences très nettes se sont produites entre les eaux de la Vanne et de la Dhuis, d'une part, et celles de l'Avre, d'autre part. Pendant que le titre nitrique restait presque constant dans les premières, malgré la diversité des conditions climatériques, il subissait dans les eaux de l'Avre des variations considérables. Ce contraste m'a suggéré des idées et des études nouvelles sur les conditions naturelles, d'où résultent la constance ou la variabilité de la constitution minérale des eaux de source, et sur un nouveau mode d'emploi de l'analyse chimique pour distinguer les eaux pures et potables de celles qu'on doit tenir pour suspectes.

Ainsi, de nouveaux points de vue m'apparaissant successivement, mon travail s'est développé bien au delà de mes prévisions; il n'est pas terminé en ce qui concerne les eaux de source ; il reste à connaître l'influence sur leur constitution des années sèches, ou humides, ou normales. Mais, sans attendre le terme nécessairement assez éloigné de ces études, je crois avoir réuni dès maintenant des observations assez nombreuses, assez originales, pour en faire la matière d'un premier Mémoire.

## I.

### AZOTE ENLEVÉ A LA TERRE VÉGÉTALE PAR L'INFILTRATION DES PLUIES.

La question de savoir combien d'azote est enlevé annuellement à la terre végétale par les infiltrations des pluies s'est présentée chaque fois qu'on a essayé d'établir, au point de vue de l'azote, la statique d'un sol, c'est-à-dire le compte de ses pertes et gains en principes azotés. Pour la résoudre, on a admis, avec raison, que l'azote entraîné se trouve presque en totalité dans les nitrates dissous; conséquemment, on s'est borné à doser l'acide nitrique dans les eaux de drainage.

On a trouvé ainsi, le plus souvent, des pertes d'azote considérables, qui donneraient à l'entraînement des principes azotés par l'infiltration des pluies une très grande importance, si on les étendait à la généralité des terres labourées; mais ce serait prendre l'exception pour la règle. Il est certain, en effet, que les résultats d'analyse publiés ont été obtenus, pour la plupart, dans des conditions où la nitrification acquérait une activité inusitée ; on a dosé l'acide nitrique exclusivement dans des eaux qui avaient traversé des champs drainés, ou des cases de végétation, ou même de simples pots. Or les terres que l'on draine ont accumulé en elles, avec le temps et en l'absence d'air, de grandes quantités de matière organique, laquelle, venant à rencontrer l'oxygène après l'installation du drainage, devient, pendant nombre d'années, une source abondante de nitrates. Quant aux cases de végétation et aux pots, on sait bien que l'émiettement de la terre, inévitable au moment du remplissage, détermine une exagération longtemps soutenue de la nitrification.

En réalité, malgré toutes les analyses d'eaux de drainage exécutées jusqu'à ce jour, malgré toutes les recherches dont la nitrification dans la terre végétale a été l'objet, nous ignorons encore combien une terre cultivée perd d'azote dissous dans les eaux d'infiltration, au cours d'une année, et la raison

au mois de février 1895, pendant que régnait un froid rigoureux qui avait suspendu tout apport d'eau de ruissellement et toute consommation de nitrates par la végétation aquatique. Je me suis empressé de la saisir, et j'ai dosé alors l'acide nitrique dans les eaux de la Seine, de l'Yonne, de la Marne, de l'Oise.

Ce premier travail en a amorcé un deuxième, dans lequel je me suis proposé de suivre, pendant une année, les variations de l'acide nitrique dans la Seine et ses trois principaux affluents, afin d'acquérir sur le *régime nitrique* des rivières des notions que n'ont pu fournir jusqu'ici des dosages isolés faits dans diverses eaux, à des dates quelconques.

En même temps, j'ai déterminé l'acide nitrique dans les eaux de source dérivées à Paris ; et cette recherche n'a pas tardé à prendre un intérêt tout spécial que je ne soupçonnais pas à son début : des différences très nettes se sont produites entre les eaux de la Vanne et de la Dhuis, d'une part, et celles de l'Avre, d'autre part. Pendant que le titre nitrique restait presque constant dans les premières, malgré la diversité des conditions climatériques, il subissait dans les eaux de l'Avre des variations considérables. Ce contraste m'a suggéré des idées et des études nouvelles sur les conditions naturelles, d'où résultent la constance ou la variabilité de la constitution minérale des eaux de source, et sur un nouveau mode d'emploi de l'analyse chimique pour distinguer les eaux pures et potables de celles qu'on doit tenir pour suspectes.

Ainsi, de nouveaux points de vue m'apparaissant successivement, mon travail s'est développé bien au delà de mes prévisions ; il n'est pas terminé en ce qui concerne les eaux de source ; il reste à connaître l'influence sur leur constitution des années sèches, ou humides, ou normales. Mais, sans attendre le terme nécessairement assez éloigné de ces études, je crois avoir réuni dès maintenant des observations assez nombreuses, assez originales, pour en faire la matière d'un premier Mémoire.

## I.

### AZOTE ENLEVÉ A LA TERRE VÉGÉTALE PAR L'INFILTRATION DES PLUIES.

La question de savoir combien d'azote est enlevé annuellement à la terre végétale par les infiltrations des pluies s'est présentée chaque fois qu'on a essayé d'établir, au point de vue de l'azote, la statique d'un sol, c'est-à-dire le compte de ses pertes et gains en principes azotés. Pour la résoudre on a admis, avec raison, que l'azote entraîné se trouve presque en totalité dans les nitrates dissous; conséquemment, on s'est borné à doser l'acide nitrique dans les eaux de drainage.

On a trouvé ainsi, le plus souvent, des pertes d'azote considérables, qui donneraient à l'entraînement des principes azotés par l'infiltration des pluies une très grande importance, si on les étendait à la généralité des terres labourées; mais ce serait prendre l'exception pour la règle. Il est certain, en effet, que les résultats d'analyse publiés ont été obtenus, pour la plupart, dans des conditions où la nitrification acquérait une activité inusitée; on a dosé l'acide nitrique exclusivement dans des eaux qui avaient traversé des champs drainés, ou des cases de végétation, ou même de simples pots. Or les terres que l'on draine ont accumulé en elles, avec le temps et en l'absence d'air, de grandes quantités de matière organique, laquelle, venant à rencontrer l'oxygène après l'installation du drainage, devient, pendant nombre d'années, une source abondante de nitrates. Quant aux cases de végétation et aux pots, on sait bien que l'[illegible]iettement de la terre, [illegible] au moment du rempliss[illegible]termine une exagération [illegible] temps soutenue de la [illegible]n.

En réalité, malgré [illegible] analyses d'eaux de [illegible] exécutées jusqu'à ce [illegible]é toutes [illegible] la nitrification dans [illegible]tale a été l'objet [illegible] rons encore combie[illegible]ultivée [illegible] dans les eaux d'inf[illegible]

de notre ignorance, c'est que nous ne savons pas recueillir ces eaux sans porter atteinte à l'état physique du sol, c'est-à-dire sans augmenter par nos manipulations son pouvoir nitrificateur.

Mais ces mêmes eaux, qui nous échappent au moment de leur infiltration, nous les retrouvons finalement dans les rivières, drains naturels où elles aboutissent, et là nous pouvons les puiser sans troubler nulle part la marche de la nitrification; leur analyse doit permettre de mesurer l'azote total ravi par elles aux terrains qu'elles ont traversés. Ainsi, ce même problème, que nous ne savons pas résoudre dans chaque cas particulier, devient soluble dans le cas général où l'on envisage tout l'ensemble des terrains composant le bassin d'un cours d'eau; la solution donne alors, d'emblée, la perte d'azote par unité de la surface embrassée. Mais, avant d'appliquer cette méthode, il est nécessaire de la discuter à divers points de vue; c'est ce que je vais faire.

1° Comme celle des eaux de drainage, et avec plus de raison encore, l'analyse pourra être bornée à la détermination de l'acide nitrique. C'est, en effet, le seul composé azoté restant, d'ordinaire, dans les eaux souterraines, au moment où elles se déversent dans les rivières. Quand on lave de la terre végétale avec de l'eau pure, on dissout, outre les nitrates, parfois des traces d'ammoniaque, et toujours de petites quantités de matières organiques azotées, dites *humiques,* qui colorent la dissolution en brun clair. Les eaux d'infiltration ne se comportent pas autrement au contact de la couche superficielle du sol occupée par la végétation, couche qui est le siège essentiel de la formation des nitrates. Mais, à mesure qu'elles s'enfoncent dans le sol et y accomplissent leur trajet, leur azote organique ou ammoniacal est entièrement converti par la combustion lente en azote nitrique, pourvu qu'elles ne soient pas absolument dénuées de carbonate calcaire ou alcalin et qu'elles trouvent dans le terrain parcouru de l'oxygène libre; c'est le cas très général, puisque les nappes souterraines et les eaux de source sont presque toujours incolores et imprégnées d'oxygène.

Dans certaines circonstances, cependant, l'oxygène fait

défaut, par exemple quand les eaux traversent des terrains chargés de débris végétaux constituant des milieux réducteurs qui détruisent les nitrates et changent les sulfates en sulfures; ou bien quand elles séjournent dans des couches géologiques contenant des minéraux oxydables, comme le silicate de protoxyde de fer des sables verts : les eaux artésiennes du puits de Grenelle sont précisément dans ce cas; aussi, d'après l'analyse de Peligot, elles ne contiennent pas trace d'oxygène ni de nitrates, mais, au contraire, du bicarbonate ferreux, preuve de leur passage en milieu réducteur. Ces circonstances sont exceptionnelles, et il me sera permis de n'en pas tenir compte dans une étude qui ne doit conduire évidemment qu'à des évaluations approximatives et non à des mesures précises.

2° On peut se demander si la présence de l'oxygène suffit pour préserver les nitrates de toute destruction, quelle que soit la durée du séjour des eaux dans le sol : ne voit-on pas ces sels servir d'aliment azoté à des organismes divers, dans des conditions de température, d'aération, d'obscurité semblables à celles où se trouvent ces eaux? Je répondrai qu'il faut à ces organismes, sauf peut-être de très rares exceptions, un aliment carboné, outre l'aliment azoté, et qu'ils ne peuvent plus se développer quand la matière humique a disparu; les nitrates se conservent alors indéfiniment. Il est possible qu'ils soient mis à contribution par les organismes qui ont pour fonction de consommer la matière organique; mais, comme ces organismes se succèdent de générations en générations depuis un temps immémorial, leur quantité a cessé de croître; il en meurt autant qu'il en naît, en sorte que la consommation des nitrates par ceux qui se développent est égale à leur reproduction aux dépens de ceux qui sont morts, sous l'action des ferments de la nitrification qui se trouvent partout.

J'admettrai, en conséquence, que les nitrates ne subissent pas de déchet sensible pendant le séjour des eaux dans le sol.

3° Mais il n'en est plus de même quand ils sont parvenus aux rivières; ils y deviennent l'aliment des tourbes, des plantes diverses qui en garnissent les lits et les bords, et des algues qui se multiplient dans leurs eaux; il se fait ainsi, par la végé-

tation aquatique, une consommation de nitrates qui n'est certainement pas négligeable, mais que personne n'a encore évaluée.

4° Une autre cause d'altération du titre nitrique des eaux de rivière est leur mélange avec les eaux de ruissellement qui, en temps de pluie, s'écoulent à la surface des terrains peu perméables sans s'y infiltrer. Ces eaux ne contiennent guère que la petite quantité de nitrate d'ammoniaque qu'elles ont rencontrée et dissoute en traversant l'atmosphère; plus pauvres que celles d'infiltration, elles en abaissent le titre en s'y mêlant.

Il résulte de la discussion précédente que les nitrates contenus dans les eaux souterraines représentent avec une fidélité suffisante l'azote perdu par les sols que ces eaux ont traversés; mais que, dans les rivières, ils peuvent être consommés par la végétation ou dilués par des eaux étrangères; par conséquent, pour que la méthode proposée donne des résultats satisfaisants, il est nécessaire que les prises d'eau pour analyse aient lieu en un temps où la végétation et le ruissellement soient nuls. Il est bien rare que ces deux conditions ne se trouvent pas réalisées simultanément au cours d'un hiver.

Elles l'ont été, en particulier, d'une manière exceptionnellement favorable, au mois de février de l'année dernière (1895), si bien qu'elles m'ont suggéré alors les études que je rapporte ici. Quand j'ai pris mes premiers échantillons d'eau, le 9 février, un froid intense régnait depuis plusieurs semaines; toutes les rivières du bassin de la Seine étaient couvertes de glaçons, et il était certain qu'elles étaient exclusivement alimentées par des eaux souterraines dont le titre nitrique ne pouvait être altéré ni par la végétation ni par le ruissellement. Le froid s'étant maintenu jusqu'à la fin de février, il m'a été permis de continuer mes prises d'échantillons pendant une vingtaine de jours.

J'ai puisé l'eau de la Seine en trois points :

Au pont de Montereau, au-dessus du confluent de l'Yonne;

Au pont de Charenton, au-dessus du confluent de la Marne;

A Paris, à la hauteur du pont des Invalides.

Les eaux de l'Yonne, de la Marne et de l'Oise ont été échantillonnées tout près de leurs confluents avec la Seine;

J'ai aussi déterminé l'acide nitrique dans les eaux des sources de la Vanne, de la Dhuis et de l'Avre, dérivées à Paris.

Pour éviter dans l'envoi des échantillons tout retard pouvant occasionner quelque altération des eaux, j'envoyais sur les lieux des prises un homme de confiance qui me rapportait les échantillons aussitôt après leur prélèvement, et dès son retour, ou au plus tard le lendemain, je procédais aux opérations qui précèdent un dosage d'acide nitrique; ces opérations consistent à vaporiser, dans un ballon de $2^{lit}$, $4^{lit}$ d'eau que l'on réduit au volume de $12^{cc}$ à $15^{cc}$; par filtration, on se débarrasse du précipité de carbonate de chaux et de silice produit au cours de la concentration; le liquide filtré et les lavages formant un volume d'environ $50^{cc}$ sont ensuite évaporés à sec, dans une petite capsule de porcelaine, à une douce chaleur; le résidu obtenu est mis sous cloche, dans une atmosphère desséchée par de la potasse solide, et peut alors attendre, sans danger d'altération, le dosage définitif de l'acide nitrique. J'emploie toujours, pour effectuer ce dosage, le procédé que j'ai décrit en 1856 dans les *Annales de Chimie et de Physique;* il consiste à réduire en liqueur acide et bouillante l'acide nitrique par le protochlorure de fer, à recueillir le bioxyde d'azote dégagé, auquel on rend ensuite l'oxygène perdu, pour le restituer à l'état d'acide nitrique dosable par l'eau de chaux titrée.

La quantité d'acide trouvée est divisée par 4, pour être rapportée à $1^{lit}$ d'eau.

Voici maintenant les résultats que j'ai obtenus :

*Seine.*

| Lieux des prises. | Dates. | Acide nitrique dans $1^{lit}$. | | Azote équivalent. | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | mgr | | mgr | |
| Montereau .... | 16 février. | 7,66 | 7,85 | 1,99 | 2,03 |
| » .... | 27 » | 8,04 | | 2,08 | |
| Charenton .... | 15 » | 9,84 | 10,21 | 2,55 | 2,65 |
| » .... | 28 » | 10,59 | | 2,75 | |

| Lieux des prises. | Dates. | Acide nitrique dans 1lit. (mgr) | Moyenne | Azote équivalent. (mgr) | Moyenne |
|---|---|---|---|---|---|
| Paris......... | 9 février. | 8,08 | 8,58 | 2,09 | 2,23 |
| » ......... | 13 » | 8,88 | | 2,31 | |
| » ......... | 19 » | 8,67 | | 2,25 | |
| » ......... | 23 » | 8,71 | | 2,26 | |
| | *Yonne.* | | | | |
| Montereau .... | 16 février. | 8,54 | 9,13 | 2,21 | 2,36 |
| » .... | 27 » | 9,73 | | 2.52 | |
| | *Marne.* | | | | |
| Charenton .... | 14 février. | 9,01 | 8,40 | 2,34 | 2,18 |
| » .... | 28 » | 7.80 | | 2,02 | |
| | *Oise.* | | | | |
| Pontoise ...... | 19 février. | 10,68 | 10,03 | 2,78 | 2,60 |
| » ...... | 1 mars. | 9,38 | | 2,43 | |
| | *Sources.* | | | | |
| Vanne, au débouché dans le réservoir de Montsouris. | 4 mars. | 10,08 | | 2,61 | |
| Dhuis, au débouché dans le réservoir de Ménilmontant. | 8 mars. | 11,03 | | 2,86 | |
| Avre, au débouché dans le réservoir de Passy. | 7 mars. | 11,87 | | 3,08 | |

On remarque tout de suite, en lisant ce Tableau, que les titres nitriques de la haute Seine et des trois principaux tributaires du fleuve, tous compris entre $7^{mgr},85$ et $10^{mgr},03$, ne présentent pas de différences bien grandes; en d'autres termes, les eaux pluviales qui, en s'infiltrant dans les bassins des quatre rivières, ont fourni les mélanges d'eaux souterraines analysés, avaient enlevé aux terres végétales traversées des quantités d'azote de même ordre.

L'azote n'est plus aujourd'hui, comme au début de la Chimie agricole, la seule mesure de la richesse du sol; mais il en reste toujours l'élément le plus précieux, et l'on est toujours fondé à penser que les terres les plus fertiles sont aussi celles qui mettent en œuvre le plus de nitrates, et qui par suite en perdent le plus; d'où cette conséquence que les bassins de rivières les plus riches sont en même temps ceux dont les eaux souterraines possèdent les plus hauts titres nitriques. A ce point de vue, s'il n'était pas imprudent de fonder des comparaisons sur quelques résultats d'analyse, il semblerait que le bassin de la haute Seine jusqu'à Montereau et ceux des trois autres rivières, pris dans leur totalité, se classent dans l'ordre décroissant suivant : l'Oise, l'Yonne, la Marne, la haute Seine.

Le Tableau ci-dessus montre encore que, du 14 au 28 février, chaque rivière a gardé à peu près un même titre; cependant, entre ces deux dates, les débits des eaux ont subi une baisse considérable. M. G. Lemoine, ingénieur en chef des Ponts et Chaussées, a bien voulu, à ma demande, calculer les débits des quatre rivières aux dates où les prises pour analyse ont eu lieu; je lui en adresse ici mes plus vifs remerciements. Les débits de la Seine à Paris n'ont pu être mesurés, parce que les embâcles accumulés devant les ponts ont rendu inapplicables les formules en usage; mais ceux du fleuve à Montereau, de l'Yonne, de la Marne et de l'Oise au point de leurs cours déjà mentionnés, ont pu être calculés avec une approximation très suffisante pour l'usage que j'en voulais faire; les voici :

| | | | |
|---|---|---|---|
| Haute Seine.. | 16 février. | 80$^{mc}$ | par seconde. |
| | 27 » | 30 | » |
| Yonne....... | 16 » | 30 | » |
| | 27 » | 30 | (barrage relevé en amont). |
| Marne ...... | 14 » | 120 | par seconde. |
| | 28 » | 55 | » |
| Oise........ | 19 » | 167 | » |
| | 1 mars. | 96 | » |

Ainsi, les débits des rivières, c'est-à-dire des sources et nappes qui les alimentaient, ont baissé de moitié pendant que

les titres nitriques demeuraient à peu près constants, comme si la constitution chimique des eaux était indépendante de leurs débits. Nous savons déjà, par les recherches de Belgrand continuées après lui dans les laboratoires de la Ville de Paris, que les titres calciques ont une certaine fixité dans les eaux de sources importantes; cependant, les quantités de sels calcaires, parmi lesquels domine ordinairement le bicarbonate, sont très variables dans les eaux d'infiltration, au moment où elles sortent de la couche de terre végétale; elles dépendent en effet de conditions naturelles qui varient sans cesse, l'humidité, la température, la tension de l'acide carbonique dans le sol. Il en est de même pour les nitrates; leur proportion, souvent considérable en été et en automne, quand la nitrification est en pleine activité, devient presque nulle à la fin de l'hiver, après le lavage par les pluies d'une terre trop froide pour nitrifier. Mais, dans les profondeurs du sol, les dissolutions calciques et nitrées formées à des époques différentes se mélangent et constituent une dissolution moyenne de composition à peu près constante; les variations des titres de la chaux et de l'acide nitrique s'éteignent dans les réservoirs souterrains comme en de vastes régulateurs. Je reviendrai sur ces importants phénomènes dans la suite de ce Mémoire.

Il faut maintenant essayer de calculer, d'après les résultats analytiques que j'ai rapportés, la quantité d'azote perdu en un temps donné, une année par exemple, par l'unité de surface du sol, soit par un hectare. Dans le calcul, doit évidemment intervenir le volume des eaux souterraines. Nous ne pouvons le déterminer par le jaugeage des débits des rivières, puisque ces débits sont accrus dans une proportion inconnue par les eaux de ruissellement; mais, au lieu de mesurer les eaux souterraines après leur sortie de terre, nous pouvons et nous allons en faire l'évaluation à leur entrée.

On connaît, pour le bassin entier de la Seine, le seul que je veuille considérer, la hauteur moyenne des pluies qui est, en nombre rond, de $700^{mm}$; on est moins fixé sur la fraction de cette hauteur qui s'infiltre réellement, pas plus que sur celle qui ruisselle ou est dissipée par l'évaporation; ces fractions sont d'ailleurs variables d'une année à l'autre. D'après les observa-

tions, en trop petit nombre, qui ont été publiées, la première varierait de $\frac{1}{5}$ à $\frac{1}{3}$ de la hauteur totale d'eau tombée; nous allons la supposer successivement de $\frac{1}{5}$, $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{3}$, soit $140^{mm}$, $175^{mm}$, $233^{mm}$, représentant des volumes de $1400^{mc}$, $1750^{mc}$, $2333^{mc}$, infiltrés par hectare. D'autre part, nous prendrons pour titre nitrique la moyenne $9^{mgr},33$ de tous les dosages qui figurent dans le Tableau ci-dessus; partant de ces données, nous trouvons les nombres suivants :

| Quantité d'eau infiltrée par hectare. | Acide nitrique emporté. | Azote correspondant. |
|---|---|---|
| mc | kg | kg |
| 1400 | 13,1 | 3,4 |
| 1750 | 16,3 | 4,2 |
| 2333 | 21,8 | 5,6 |

Telles seraient, dans les trois hypothèses, les pertes moyennes d'azote par hectare, dans le bassin de la Seine. Mais, pour être plus près de la réalité, il convient de les estimer plus haut. En effet, le mode d'exploitation du sol a la plus grande influence sur la production des nitrates; c'est essentiellement dans les terres labourées que la nitrification s'établit; et l'on admet qu'elle est faible ou nulle dans les sols occupés par les bois, les prairies, les landes. Toutefois, sur ce point, on manque d'observations, et l'on s'en tient à des considérations théoriques. Je ne serais nullement surpris si quelque observateur démontrait que les bois et les prairies qui couvrent des sols contenant du calcaire, fournissent aux eaux d'infiltration de notables quantités de nitrates. Mais gardons l'opinion générale, et attribuons aux seules terres labourées le pouvoir de nitrifier et, par conséquent, de perdre de l'azote; elles occupent, d'après la statistique, les deux tiers du territoire agricole; multiplions donc par $\frac{3}{2}$ les chiffres ci-dessus, pour avoir les pertes moyennes d'un hectare de terre labourée, nous obtenons les chiffres suivants :

| Quantité d'eau infiltrée par hectare. | Acide nitrique emporté. | Azote correspondant |
|---|---|---|
| mc | kg | kg |
| 1400 | 19,6 | 5,1 |
| 1750 | 24,5 | 6,4 |
| 2333 | 32,7 | 8,5 |

Les valeurs de ces pertes en argent sont, en comptant le kilogramme d'azote à $1^{fr},50$ :

$7^{fr},65$, $9^{fr},60$, $12^{fr},75$.

Les calculs que je viens de présenter n'ont d'autre prétention que de fournir une première et peut-être grossière approximation de l'évaluation des pertes d'azote ravi par les eaux d'infiltration; toutefois, ils démontrent que ces pertes sont beaucoup moindres qu'on ne l'admet généralement, en se fondant sur les analyses publiées d'eaux de drainage. Je suis persuadé qu'elles sont plus que balancées par l'absorption spontanée de l'ammoniaque atmosphérique; j'ai montré, en effet, qu'une terre nue et humide emprunte à l'air, en un mois, $5^{kg}$ d'azote ammoniacal par hectare; sous notre climat, les terres labourées restent, pour la plupart, en cet état, l'hiver, pendant plusieurs mois. Toutes les terres calcaires ou non calcaires, capables de porter des céréales, réalisent à peu près un même gain d'ammoniaque; mais les pertes d'azote se répartissent très inégalement entre elles; ces pertes sont proportionnées à l'intensité de la nitrification, et cette intensité est proportionnée à la fertilité des sols; on peut donc assimiler les pertes d'azote à un impôt proportionnel sur les terres labourées, qui pèse peu sur les pauvres, et ne grandit qu'avec leur richesse.

## II.

### VARIATIONS DU TITRE NITRIQUE PENDANT TREIZE MOIS CONSÉCUTIFS DANS LES EAUX DE LA SEINE, DE L'YONNE, DE LA MARNE ET DE L'OISE.

Après avoir déterminé les quantités d'acide nitrique que contenaient, dans les conditions climatériques toutes spéciales du mois de février 1895, les eaux de la Seine et de ses trois affluents principaux, j'ai pensé qu'il serait utile de con-

tinuer ces dosages, malgré leur monotonie, au moins pendant une année, afin d'acquérir, sur ce qu'on pourrait appeler le régime nitrique des rivières, des notions que n'ont pu donner jusqu'à présent quelques dosages isolés, sans suite, faits à des dates quelconques. Je vais, dans ce Chapitre, présenter et discuter les résultats que j'ai obtenus dans cette voie, du mois de février 1895 au même mois de l'année 1896.

Les échantillons d'eau ont été puisés aux lieux déjà indiqués, savoir :

Pour la Seine, au-dessus de Montereau, au-dessus de Charenton, et, dans Paris, à la hauteur du pont des Invalides;

Pour les autres rivières, à la fin de leurs cours, mais avant leur confluent avec le fleuve.

Les prises, au pont des Invalides, ont été répétées au moins une fois et deux fois le plus souvent, par semaine; toutes les autres ont été faites à peu près une fois par mois; on a toujours usé des précautions déjà mentionnées pour éviter toute altération des nitrates.

| | | YONNE À MONTEREAU. | | MARNE À CHARENTON. | | OISE À PONTOISE. | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Dates. | Acide nitrique. | Dates. | Acide nitrique. | Dates. | Acide nitrique. |
| | | | mgr | | mgr | | mg |
| 1895 | Février.... | 16 | 8,54 | 16 | 9,01 | 16 | 10,68 |
| » | » .... | 27 | 9,73 | 28 | 7,80 | » | » |
| » | Mars...... | » | » | » | » | 1 | 9,38 |
| » | Avril ..... | 9 | 7,18 | 10 | 4,78 | 11 | 7,06 |
| » | » ..... | 16 | 6,71 | 19 | 5,34 | » | » |
| » | Mai....... | 9 | 5,34 | 10 | 4,87 | 11 | 6,78 |
| » | Juin ...... | 8 | 4,98 | 10 | 3,99 | 12 | 6,80 |
| » | Juillet..... | 12 | 3,98 | 13 | 3,86 | 15 | 6,65 |
| » | Août...... | 9 | 3,51 | 10 | 3,84 | 12 | 6,43 |
| » | Septembre. | 19 | 3,13 | 20 | 3,27 | » | » |
| » | Octobre ... | » | » | » | » | » | » |
| » | Novembre.. | 6 | 5,22 | 8 | 5,36 | 9 | 7,32 |
| » | Décembre.. | 13 | 7,09 | 14 | 6,48 | 16 | 6,66 |
| 1896 | Janvier.... | 30 | 9,25 | 31 | 7,60 | » | » |
| » | Février ... | » | » | » | » | 1 | 8,96 |

SEINE.

| | Avant Montereau. | | Avant Charenton. | | Au pont des Invalides (1). | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Dates. | Acide nitrique. | Dates. | Acide nitrique. | Dates. | Acide nitrique. |
| | | mgr | | mgr | | mgr |
| 1895 Février.... | 16 | 7,66 | 15 | 9,84 | 19 | 8,67 |
| » » .... | 27 | 8,04 | 28 | 10,59 | 28 | 9,00 |
| » Mars...... | » | » | » | » | » | » |
| » Avril...... | 9 | 3,48 | 10 | 5,35 | 10 | 5,15 |
| » » ...... | 16 | 5,25 | 19 | 6,30 | 19 | 6,19 |
| » Mai....... | 9 | 6,07 | 10 | 5,81 | 11 | 5,57 |
| » Juin ...... | 8 | 4,87 | 10 | 4,87 | 10 | 4,80 |
| » Juillet..... | 12 | 4,14 | 13 | 4,18 | 13 | 4,15 |
| » Août...... | 9 | 4,11 | 10 | 4,03 | 10 | 4,29 |
| » Septembre. | 19 | 4,38 | 20 | 4,09 | 20 | 3,85 |
| » Octobre ... | » | » | » | » | » | » |
| » Novembre.. | 6 | 5,53 | 8 | 6,50 | 8 | 6,38 |
| » Décembre.. | 13 | 7,13 | 14 | 7,23 | 14 | 7,13 |
| 1896 Janvier.... | 30 | 7,66 | 31 | 9,92 | 31 | 8,62 |
| » Février.... | » | » | » | » | 15 | 8,94 |

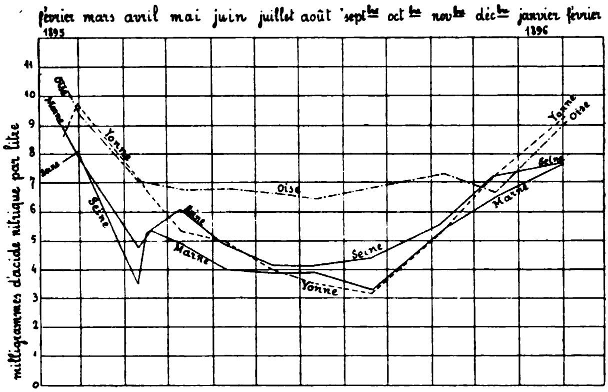
Les résultats inscrits dans ces deux Tableaux deviennent plus frappants, quand on les met sous la forme de graphiques, en prenant pour abscisses les dates des prises et pour ordonnées les quantités d'acide nitrique. J'ai dressé de la sorte deux graphiques; à l'aide du premier, on peut comparer facilement les variations de l'acide nitrique dans la haute Seine, l'Yonne, la Marne et l'Oise; le second fait voir comment cet acide varie dans la Seine en divers points de son cours.

Un coup d'œil sur la *fig.* 1 révèle une concordance assez inattendue entre les variations des titres nitriques dans les quatre rivières; les titres les plus élevés se sont produits en même temps au mois de février 1895, à la fin de la période des grands froids, quand les rivières étaient exclusivement

(1) Il m'a paru inutile de surcharger le Tableau d'une centaine de dosages dans l'eau de Seine puisée au pont des Invalides. Parmi ces dosages, je ne fais figurer que ceux dont les dates correspondent à peu près à celles des dosages effectués dans les eaux puisées à Montereau et à Charenton.

alimentées d'eaux souterraines; puis les titres ont subi une baisse rapide, à la suite du dégel survenu en mars et des ruissellements qui en ont été la conséquence. En avril et mai, ils continuent à baisser dans l'Oise et l'Yonne; ils se relèvent un peu dans la Marne et la haute Seine, pour redescendre bientôt après. Pendant la saison chaude, tous restent voisins de leurs minimum. Cependant, l'été de 1895 ayant été passablement sec, les rivières n'ont guère reçu de ruissellements, et

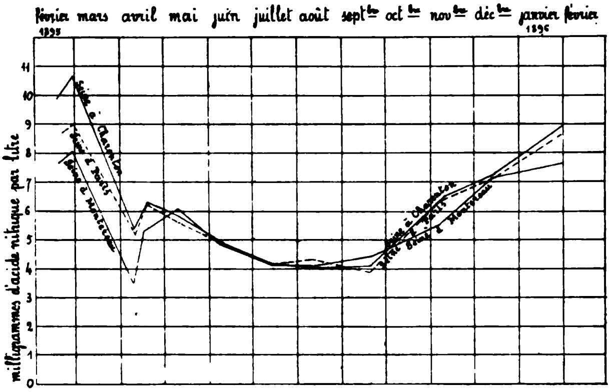
Fig. 1.




leur alimentation s'est faite surtout par les eaux souterraines qui leur ont apporté tout leur approvisionnement de nitrates. Une partie de ces sels a donc disparu, et c'est évidemment la végétation aquatique qui l'a consommée. Ses effets sont d'autant plus manifestes, qu'elle s'exerce dans de moindres volumes d'eau, et que la température est plus élevée, deux conditions qui ont été réalisées d'une façon exceptionnelle pendant le mois de septembre; la chaleur a été très forte, durant plusieurs semaines, et le débit de la Seine à Paris est tombé à $55^{mc}$; de plus, les barrages, en retenant les eaux, prolongeaient singulièrement leur séjour en rivière; ainsi, la végétation avait, pour consommer les nitrates, toute l'activité possible et tout le temps nécessaire; il en est résulté que les titres sont alors descendus à leurs limites inférieures. A partir d'octobre, ils sont remontés progressivement, et, en fé-

traverse; toutes ces eaux sont encore plus chargées de nitrates que celles de l'Yonne; aussi, à l'arrivée à Charenton, le titre s'élève le 28 février à $10^{mgr},59$. Mais celui de la Marne est alors seulement de $7^{mgr},8$; cette rivière abaisse donc le titre de la Seine qui n'est plus à Paris, le 28 février, que de $9^{mgr}$. Pendant la saison chaude, les différences que je viens de signaler entre les titres de la haute Seine, de l'Yonne et de la Marne dispa-

Fig. 2.




raissent; les bas titres sont très voisins et se confondent presque dans les graphiques; mais, à la fin de janvier, quand a repris l'alimentation presque exclusive des rivières par les eaux souterraines, les titres se différencient de nouveau et se classent dans le même ordre qu'en février 1895.

Il serait intéressant de continuer pendant plusieurs années la détermination des plus hauts titres dans toutes les rivières d'une certaine importance tributaires de la Seine, au moment où leurs eaux représentent fidèlement les mélanges des eaux souterraines de leurs bassins. Si, selon l'hypothèse émise au Chapitre I, la richesse en nitrates de ces eaux va de pair avec la fertilité des sols, une classification des bassins selon les titres nitriques de leurs eaux souterraines devra être conforme, dans une certaine mesure, à la classification selon la richesse agricole dressée à l'aide des documents statistiques publiés par le Ministère de l'Agriculture.

J'ai commencé cette étude des plus hauts titres des tributaires de la Seine, au mois de février 1896; mais, les conditions climatériques venant à changer, il ne m'a plus été permis de la continuer; je compte la reprendre l'hiver prochain. Voici, en attendant, quelques résultats :

| | | | mgr |
|---|---|---|---|
| Bassin de la Marne.... | 18 février. | Grand-Morin, à Esbly..... | 10,64 |
| | » | Petit-Morin, à la Ferté.... | 8,23 |
| Bassin de l'Eure.... | 17 » | Blaise, au-dessus de Dreux. | 15,47 |
| | » | Avre, à Nonancourt...... | 12,62 |
| Bassin du Loing.... | 19 » | Loing, à Moret.......... | 11,82 |
| Bassin de l'Essonne. | 20 » | Essonne, à Corbeil....... | 12,10 |

A la même époque, je trouvais dans la Seine, à Paris. 8,10

M. G. Lemoine, avec son inépuisable complaisance, a bien voulu recommencer, pour les débits de la Seine à Paris, aux dates de mes prises d'échantillons, les calculs par lesquels il avait déterminé déjà les débits de la haute Seine, de l'Yonne, de la Marne et de l'Oise en février 1895. Dans le Tableau suivant, j'ai placé en regard les titres nitriques et les débits correspondants.

| Dates. | | Titres nitriques. | Débits par seconde. |
|---|---|---|---|
| | | mgr | mc |
| 1895 | 19 février................ | 8,67 | 230 |
| » | 28 » ................ | 9,00 | 100 |
| » | 10 avril.................. | 5,15 | 465 |
| » | 19 » .................. | 6,19 | 170 |
| » | 11 mai.................. | 5,57 | 90 |
| » | 10 juin .................. | 4,80 | 95 |
| » | 13 juillet................. | 4,15 | 70 |
| » | 10 août.................. | 4,29 | 80 |
| » | 20 septembre............. | 3,85 | 55 |
| » | 8 novembre............. | 6,38 | 80 |
| » | 14 décembre............. | 7,13 | 350 |
| 1896 | 31 janvier ............... | 8,62 | 225 |
| » | 15 février................ | 8,94 | 125 |

Ce Tableau ne montre aucune relation apparente entre les

titres et les débits, à part la diminution qui affecte les uns et les autres pendant l'étiage; il n'en peut être autrement, puisqu'un même débit peut être produit par les mélanges les plus divers d'eaux souterraines et d'eaux de ruissellement, et que, pendant qu'on l'observe, la végétation aquatique peut avoir tous les degrés possibles d'activité. Nous retiendrons seulement cette observation qu'au mois de février 1896, la Seine ne roulant que des eaux souterraines, j'ai trouvé les mêmes hauts titres $8^{mgr},62$ — $8^{mgr},94$ qu'au mois de février 1895, $8^{mgr},67$ — $9^{mgr}$, ce qui confirme l'hypothèse émise au Chapitre I, d'après laquelle le mélange des eaux souterraines d'un bassin de rivière possède un titre à peu près constant, au moins pendant treize mois consécutifs.

Il est possible que ce titre moyen soit assujetti à des variations lentes, déterminées par la succession en séries des années humides, sèches ou normales; les progrès dans la culture du sol peuvent aussi l'influencer. Des recherches ultérieures feront connaître l'amplitude de ces variations; tout ce qu'il est permis de supposer jusqu'à présent, c'est que le titre nitrique des eaux souterraines d'un bassin est exempt de sauts brusques et se soutient à peu près le même au cours d'une année.

## III.

### L'ACIDE NITRIQUE DANS LES EAUX DES SOURCES DE LA VANNE ET DE LA DHUIS.

Les déterminations de l'acide nitrique dans les eaux de source dérivées à Paris, exécutées d'abord dans le seul but d'ajouter quelques renseignements à ceux que m'avaient donnés les eaux de la Seine, de l'Yonne, de la Marne et de l'Oise, ont pris un intérêt dont je ne me doutais pas d'abord, quand j'ai compris qu'elles pouvaient intervenir utilement comme élément de discussion dans la recherche et le choix des eaux potables.

On sait qu'il y a des distinctions à établir entre les sources :

les unes débitent des eaux parfaitement filtrées, bien dépouillées de matière organique après un séjour prolongé dans un terrain oxygéné; ce sont de vraies sources offrant les meilleures garanties de salubrité. D'autres ne sont évidemment que des issues par lesquelles réapparaissent au jour des rivières qui se sont perdues, en partie ou en totalité, dans des terrains très perméables; ce sont de fausses sources, dont les eaux plus ou moins contaminées par une première circulation à la surface du sol, n'ont pas été complètement débarrassées de leurs souillures pendant leur voyage souterrain. D'autres, enfin, ne sauraient être rangées sûrement ni parmi les vraies ni parmi les fausses sources; elles sont seulement suspectes, parce que l'on peut craindre que leurs eaux, quoique fraîches, limpides et pures en apparence, ne soient des mélanges d'eaux de vraies sources et d'eaux de rivière ou de ruissellement venues par des voies trop rapides, trop larges, qui les ont affranchies d'une parfaite filtration. C'est à distinguer les sources vraies des sources fausses ou suspectes que peut servir l'étude du titre nitrique.

Admettons en effet, provisoirement, que ce titre, dans une vraie source, demeure, sinon constant, du moins compris entre des limites peu écartées. Nous savons qu'il est très faible dans les eaux de ruissellement, et très variable dans une eau de rivière; si donc une source n'est que la réapparition d'une rivière, ou un mélange en proportions diverses d'eaux souterraines et d'eaux de ruissellement, son titre doit être essentiellement variable. Ainsi, semble-t-il, la nature d'une source peut être reconnue à l'amplitude des variations de son titre nitrique.

Un tel moyen d'information, je tiens à le faire remarquer, ne peut permettre de décider, avec une entière certitude, si l'eau d'une source doit être acceptée ou rejetée comme boisson. L'eau de rivière ou de ruissellement n'est pas nécessairement souillée de germes infectieux, parce qu'elle a coulé quelque temps à la surface du sol; le serait-elle, que ces germes peuvent être arrêtés en chemin, avant d'arriver à la source, si l'eau rencontre et traverse quelque terrain sableux qui en opère la filtration. Mais les procédés en usage pour l'étude des

eaux potables ne sont pas non plus parfaits, bien au contraire; en certains cas, mais non pas dans tous les cas, ils révèlent la mauvaise qualité de ces eaux, mais ils ne permettent guère d'affirmer qu'elles sont absolument propres à l'alimentation. Le mode d'examen que je propose fournira un élément de plus pour la solution de la question, élément qui pourra montrer qu'une eau est suspecte, quand les autres méthodes ne l'indiqueraient pas.

Ce n'est pas le moment d'insister sur les services que l'hygiène peut en attendre; le plus pressé est maintenant de savoir si réellement le titre nitrique d'une vraie source est peu variable.

Je vais étudier à ce point de vue les eaux de la Vanne et de la Dhuis; j'examinerai plus tard celles de l'Avre qui en diffèrent très nettement.

Grâce à l'autorisation qui m'a été accordée avec empressement par M. Humblot, inspecteur général des Ponts et Chaussées et directeur du Service des eaux, j'ai pu faire les prises d'échantillons aux débouchés mêmes des aqueducs de la Vanne, de la Dhuis et de l'Avre dans leurs réservoirs respectifs de Montsouris, Ménilmontant et Passy.

Dans les deux Tableaux qui vont suivre on trouvera les déterminations de la chaux à côté de celles de l'acide nitrique, et l'on se demandera peut-être pourquoi j'ai ajouté le dosage de l'alcali à celui de l'acide; peut-être aussi voudra-t-on savoir pourquoi, dans une question où les conclusions doivent reposer sur l'analyse chimique, je m'en tiens au dosage de deux éléments, au lieu de les déterminer tous, sulfates, chlorures, bicarbonates alcalins ou terreux, silice, gaz dissous, matière organique. Je répondrai qu'il s'agit uniquement ici de saisir des différences de constitution chimique entre les eaux de source, d'une part, et celles de rivière ou de ruissellement, d'autre part. S'agit-il de différencier les eaux de source de celles de rivière? Ce sont surtout la matière organique et l'acide nitrique qui les distinguent; ni la silice, ni les sels autres que les nitrates, ni les gaz dissous ne fournissent des différences qu'on puisse utilement interpréter. Le dosage précis, direct de la matière organique est une opération trop

longue, trop délicate, pour être répétée un grand nombre de fois; je m'en suis abstenu, ne voulant pas surcharger mes recherches d'un énorme travail. C'est encore l'acide nitrique qui établit une différence essentielle entre les eaux de source et celles de ruissellement; mais il n'est pas le seul élément à doser; il convient de déterminer en même temps la chaux, parce qu'elle est bien plus abondante dans les premières et sert dès lors à les distinguer des secondes. J'ai donc toujours dosé cette base, non par le procédé dit *hydrotimétrique*, qui, s'il est très rapide, satisfait peu un analyste, mais par la méthode usuelle qui consiste à l'isoler à l'état d'oxalate insoluble. Voici maintenant les deux Tableaux annoncés : l'acide nitrique et la chaux y sont exprimés en milligrammes et rapportés à 1 litre d'eau ([1]).

*Vanne.*

| Dates. | | Acide nitrique. | Chaux. |
|---|---|---|---|
| | | mgr | mgr |
| 1895 | 4 mars | 10,08 | 111,2 |
| » | 2 avril | 9,86 | 111,2 |
| » | 18 » | 10,14 | 110,6 |
| » | 28 » | 10,16 | 111,1 |
| » | 13 mai | 10,13 | 113,6 |
| » | 1 juin | 9,51 | 115,8 |
| » | 4 juillet | 9,81 | 116,3 |
| » | 1 août | 9,85 | 117,9 |
| » | 27 » | 10,00 | 115,4 |
| » | 28 septembre | 9,81 | 125,3 ([2]) |
| » | 28 octobre | 10,07 | 111,3 |
| » | 26 novembre | 10,00 | 112,4 |
| » | 28 décembre | 10,70 | 113,9 |
| 1896 | 29 janvier | 11,34 | 111,3 |
| » | 21 février | 10,95 | 114,3 |
| » | 27 » | 10,86 | 115,4 |
| » | 19 mars | 10,57 | 114,4 |
| » | 13 avril | 10,82 | 113,1 |

([1]) L'acide nitrique a toujours été dosé dans le résidu d'évaporation de $4^{lit}$; la chaux a été dosée dans $1^{lit}$, préalablement filtré.

([2]) Il est probable que ce chiffre est trop fort de $10^{mgr}$; dans la lecture du poids, on a dû prendre le poids de $10^{mgr}$ pour le poids de $20^{mgr}$.

*Dhuis.*

| | Dates. | Acide nitrique. | Chaux. |
|---|---|---|---|
| | | mgr | mgr |
| 1895 | 9 mars | 11,30 | 112,1 |
| » | 18 avril | 11,82 | 112,4 |
| » | 28 » | 11,80 | 112,6 |
| » | 14 mai | 11,74 | 112,4 |
| » | 1 juin | 11,65 | 106,5 |
| » | 4 juillet | 11,93 | 104,8 |
| » | 31 » | 11,90 | 103,3 |
| » | 27 août | 10,40 | 99,8 |
| » | 28 octobre | 11,92 | 94,0 |
| » | 26 novembre | 11,80 | 95,6 |
| » | 28 décembre | 11,99 | 109,2 |
| 1896 | 29 janvier | 11,30 | 106,9 |
| » | 27 février | 12,03 | 103,8 |
| » | 18 mars | 11,03 | » |
| » | 13 avril | 11,82 | 118,5 |

Voici les titres moyens de l'acide et de la chaux, et les plus grands écarts en deçà ou au delà de ces titres :

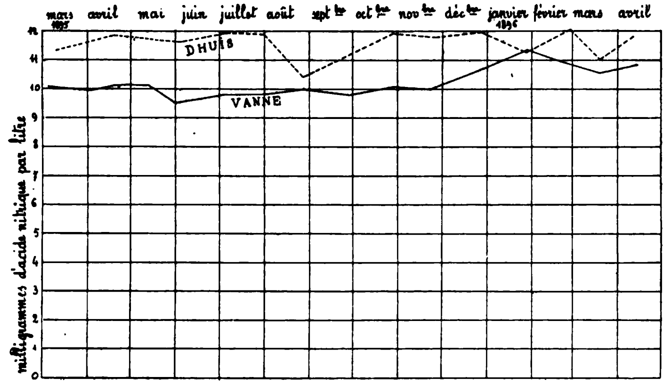
| | VANNE. | | DHUIS. | |
|---|---|---|---|---|
| | Acide nitrique. | Chaux. | Acide nitrique. | Chaux. |
| | mgr | mgr | mgr | mgr |
| Titres moyens | 10,26 | 114,2 | 11,61 | 106,5 |
| Écarts les plus grands au-dessus des titres | +1,08 | +11,1 | +0,42 | +12 |
| Écarts les plus grands au-dessous des titres | —0,75 | — 3,6 | —1,21 | —12,25 |

On voit que l'écart le plus grand est, pour l'acide nitrique, dans les deux eaux, d'environ $\frac{1}{10}$ des titres moyens; pour la chaux, il est un peu moindre dans l'eau de Vanne, un peu plus grand dans celle de la Dhuis.

Quelques observations intéressantes sont suggérées par la représentation graphique des variations des titres nitriques et calciques dans les deux eaux :

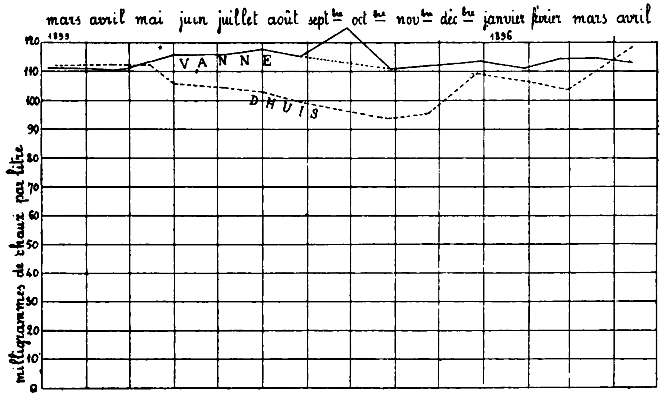
Le *fig.* 3 fait voir que les variations du titre nitrique dans l'eau de la Vanne n'ont aucune relation avec celles qu'on ob-

Fig. 3.




serve dans l'eau de la Dhuis ; la *fig.* 4 montre que les variations des titres calciques sont dans le même cas. Il en serait autrement si toutes ces variations étaient sous la dépendance

Fig. 4.




immédiate des circonstances climatériques, comme le sont les débits des sources, lesquels, en même temps, s'élèvent après les pluies d'hiver ou s'abaissent par l'effet des sécheresses. Elles dépendent probablement des accidents de la surface et de

l'intérieur des bassins des eaux : il suffit que ces accidents diffèrent d'un bassin à l'autre pour que les variations qu'ils occasionnent ne concordent ni dans le temps, ni dans leur grandeur.

On n'aperçoit pas davantage de concordance entre les variations du titre nitrique et du titre calcique dans chacune des deux eaux. Elles concorderaient sûrement si, dans une eau de source, les quantités de nitrates et de sels calcaires, parmi lesquels domine le bicarbonate, se trouvaient toujours dans un rapport constant; mais nous savons au contraire que les conditions de la formation du bicarbonate de chaux et celles de la nitrification sont fort différentes; la chaleur développe la nitrification, mais restreint la production du bicarbonate; le froid arrête la formation des nitrates et favorise celle du sel calcaire; la sécheresse laisse intacts les nitrates formés et détruit le bicarbonate. Au reste, pendant qu'elles traversent un terrain et y séjournent, les eaux peuvent perdre une partie de leur bicarbonate, ou en acquérir de nouveau, selon que la tension du gaz carbonique diminue ou augmente dans l'atmosphère ambiante, tandis que la quantité des nitrates demeure invariable. De ces explications il résulte que les titres nitrique et calcique sont indépendants l'un de l'autre ; donc leurs variations ne peuvent être que discordantes.

Il était intéressant de comparer les titres des deux sortes avec les débits des sources. Ces débits sont fréquemment relevés par le Service des eaux; M. Humblot a bien voulu me les communiquer. Dans le Tableau suivant, j'ai mis les plus forts et les plus faibles débits, exprimés en litres et rapportés à la seconde, en regard des titres correspondants.

*Vanne.*

| | | Dates. | Débits. | Acide nitrique. | Chaux. |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | litres | mgr | mgr |
| Débits les plus forts....... | 1895 | 2 avril...... | 1533 | 9,86 | 111,2 |
| | 1896 | 29 janvier.... | 1645 | 11,34 | 111,3 |
| | » | 21 février.... | 1583 | 10,95 | 114,3 |
| | » | 9 mars...... | 1576 | 10,57 | 114,7 |
| Débits les plus faibles...... | 1895 | 28 septembre. | 1166 | 9,81 | 125,3 ? |
| | » | 28 octobre ... | 1120 | 10,07 | 111,3 |
| | » | 26 novembre . | 1132 | 10,00 | 112,4 |

*Dhuis.*

| | | Dates. | Débits. | Acide nitrique. | Chaux. |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | litres | mgr | mgr |
| Débits les plus forts ....... | 1895 | 14 mai ....... | 208 | 11,74 | 112,4 |
| | » | 27 août ...... | 186 | 10,40 | 99,8 |
| | 1896 | 9 mars ...... | 215 | 11,03 | » |
| Débits les plus faibles...... | 1895 | 28 octobre ... | 178 | 11,92 | 94,0 |
| | » | 26 novembre . | 173 | 11,80 | 95,6 |

Ce Tableau montre qu'il n'y a pas de rapport entre les débits des sources et les titres de leurs eaux. Nous avons déjà fait la même observation, après avoir comparé les débits de la Seine en divers points de son cours, de l'Yonne, de la Marne et de l'Oise, avec les titres nitriques trouvés dans ces rivières aux époques où elles étaient exclusivement alimentées d'eaux souterraines exemptes d'altération : pendant que les débits variaient dans le rapport de 2 à 1, les titres restaient à peu près constants, et celui de la Seine à Paris se reproduisait le même, dans des circonstances semblables, à un an d'intervalle. Ainsi, la constance que nous avons trouvée dans des eaux souterraines, mélanges d'eaux d'un grand nombre de sources, nous la retrouvons maintenant dans les eaux de grandes sources isolées.

Bornons-nous, pour le moment, à enregistrer tous ces résultats d'études analytiques; nous les interpréterons sans peine à la fin du Chapitre qui va suivre.

## IV.

### CONSTANCE DE LA CONSTITUTION MINÉRALE DES GRANDES SOURCES.

Je vais maintenant essayer d'expliquer pourquoi, dans les eaux des sources importantes, les proportions des éléments minéraux, celles de l'acide nitrique et de la chaux en particulier, doivent demeurer comprises entre des limites rapprochées.

Les géologues divisent les terrains perméables en deux catégories, au point de vue de leurs rapports avec l'eau; les terrains sableux, et ceux qui sont formés de roches stratifiées ou non. J'adopterai la même division, et m'occuperai d'abord des terrains sableux, non sans faire observer que le mot *sableux* veut dire composé de menus débris de roches, y compris le calcaire fin et l'argile plus fine encore, aussi bien que les sables proprement dits; il ne signifie pas, comme pourrait le croire un agriculteur, que ces menus débris sont entre eux sans cohésion.

Je considère donc un terrain sableux, en son état d'humectation normale, celui auquel il revient quand il s'est ressuyé spontanément après une sursaturation passagère. Survient une pluie qui occasionne une nouvelle infiltration d'eau; si le terrain était absolument gorgé d'eau, que tous les interstices entre ses éléments en fussent remplis, personne ne douterait que ce nouvel apport ne déterminât un mouvement général de toute la masse liquide, de façon qu'il sortît par le bas du terrain autant d'eau qu'il en serait entré par le haut. Mais je suis en présence d'un terrain ressuyé, c'est-à-dire dont tous les éléments, mouillés à la vérité d'une mince couche d'eau, laissent place cependant dans leurs interstices aux gaz de l'atmosphère; c'est un état très différent de celui de la saturation complète, état, d'ailleurs, qui est normal dans toute l'épaisseur d'un terrain sableux comprise, en remontant, entre la nappe souterraine où aboutissent toutes les infiltrations, et la couche de terre où l'appel de l'eau vers la surface pour les besoins de l'évaporation ne se fait plus sentir. Néanmoins, les mouvements de l'eau sont les mêmes dans un terrain ressuyé que dans celui qui serait exactement rempli; une nouvelle infiltration y produit encore un déplacement général qu'on se représentera fidèlement en supposant l'existence d'une multitude de tranches égales et parallèles à la surface se transmettant de l'une à l'autre le liquide qui les imbibe, de manière que l'eau qui sort du terrain est précisément celle qui occupait la tranche la plus basse.

Je n'en dirai pas plus sur le mécanisme de ce phénomène; je l'ai décrit et expliqué sous le nom de *déplacement* dans les

*Contributions à l'étude de la Chimie agricole* (Encyclopédie de Frémy). Je m'en suis servi pour extraire de diverses terres végétales, sans altération ni dilution, les dissolutions qui s'y trouvaient contenues. Mais il faut que je signale ici l'importance capitale de son rôle dans la purification des eaux par le sol : en réglant les mouvements des infiltrations de manière qu'elles se suivent méthodiquement selon l'ordre de leurs dates, il les oblige à séjourner dans le sol, au contact de l'oxygène et des organismes purificateurs, pendant des temps à peu près égaux, suffisants pour la complète épuration. Il n'en serait plus ainsi, et la pureté des eaux serait compromise, si certaines de ces infiltrations, précipitant leurs mouvements, et devançant les autres, pouvaient arriver à la source avant le temps voulu.

Ces notions si simples, si élémentaires, je les ai inutilement cherchées dans les meilleurs Ouvrages d'Hydrologie. Dans l'étude des mouvements de l'eau, les auteurs ne tiennent guère compte des différences de constitution dues aux matières dissoutes, encore moins du déplacement des dissolutions successivement formées par les infiltrations; pour eux, semble-t-il, l'eau est partout un même liquide, dont ils n'analysent pas le mode de cheminement dans les sols. Cette absence de distinctions est la cause d'erreurs très répandues : combien de gens, par exemple, qui, voyant une source grossir après des pluies, s'imaginent que l'eau sortant de terre sous leurs yeux est précisément celle que ces pluies ont apportée, et qui partent de là pour calculer le temps qu'elle a mis à se transporter de la surface du sol jusqu'à la source! Ce temps est, en réalité, celui de la *propagation* du déplacement, c'est-à-dire de la transmission, de l'une à l'autre des tranches dont il a été déjà question, des excédents d'eau qu'elles ne peuvent retenir. Confondre la propagation du déplacement avec le transport effectif d'une même quantité d'eau, de l'origine à la fin de l'espace occupé par les infiltrations, c'est à peu près donner à toute une masse liquide la vitesse d'une onde qui court à sa surface.

Les eaux souterraines ne vont pas si vite; dans les terrains d'où sortent les sources, elles séjournent beaucoup plus longtemps et se meuvent beaucoup plus lentement qu'on ne

pense. Voici un calcul très simple, propre à fixer les idées sur ce point. Supposons que la densité apparente d'un terrain soit de 1,5, c'est-à-dire que, sous le volume de $1^{lit}$, il pèse $1^{kg},5$, et que sa capacité d'humectation normale, en d'autres termes, que la proportion d'eau qu'il peut retenir après ressuyage soit de 10 pour 100 de son poids; ces hypothèses ne sont nullement exagérées. Supposons encore que la hauteur des pluies soit pour une année de $600^{mm}$, dont le tiers s'infiltre dans le sol. Une tranche de terrain de $1^{m}$ d'épaisseur retiendra une tranche d'eau de $0^{m},10 \times 1,5$ ou $0^{m},15$ d'épaisseur: donc, pour retenir une tranche de $\frac{600^{mm}}{3}$, il suffira d'une tranche de terrain de $1^{m},33$; en sorte qu'avec une épaisseur de $10^{m}$ seulement au-dessus d'une source, ou plutôt au-dessus de la nappe souterraine qui l'alimente, le terrain emmagasinera les eaux d'infiltration de plus de sept années, ce qui veut dire que ces eaux mettront tout ce laps de temps à descendre de sa surface jusqu'à la nappe.

Après cette digression sur le jeu et l'importance du *déplacement,* je reviens au terrain sableux que j'envisageai ci-dessus, et reprends ma démonstration interrompue : il s'agit de mettre en évidence les circonstances qui tendent à unifier la constitution des eaux des grandes sources, en déterminant le mélange d'infiltrations datant d'époques différentes.

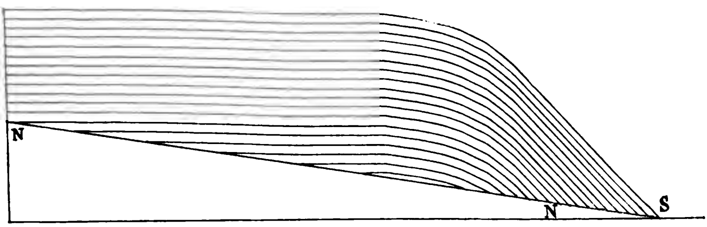
Les apports successifs des pluies forment dans la couche végétale autant de dissolutions qui s'en échappent à tour de rôle en emportant des quantités très diverses de nitrates, de bicarbonate calcaire et autres sels. Ces dissolutions descendent dans le sol en se déplaçant, et conservent d'abord leurs différences; aussi trouve-t-on des variations considérables de composition, surtout en ce qui concerne les nitrates, dans les eaux de drainage ordinaires, qui sont recueillies, à la faible profondeur de $1^{m},2$ à $1^{m},5$, dans une canalisation parallèle à la surface du terrain et alimentée partout en même temps de dissolutions contemporaines. Mais les déplacements ne s'opèrent pas avec une précision mathématique; à mesure qu'ils se multiplient par leur progrès en profondeur, les dissolutions successives subissent d'inévitables mélanges qui sont

évidemment une première cause d'unification de la constitution des eaux.

En voici une autre d'un effet plus assuré.

Que les dissolutions se mêlent ou non en se déplaçant, on peut toujours diviser le terrain par la pensée en tranches successives contenant chacune une des dissolutions; or, dans un terrain sableux, toutes les infiltrations aboutissent à une nappe continue, dont la surface, modelée selon le relief du sol, est nécessairement inclinée partout vers une issue, c'est-à-dire une source. En raison même de son inclinaison, cette nappe coupe un certain nombre de tranches du terrain, et en reçoit des dissolutions de constitutions et d'âges différents dont elle opère le mélange. C'est ce que représente la coupe suivante

Fig. 5.



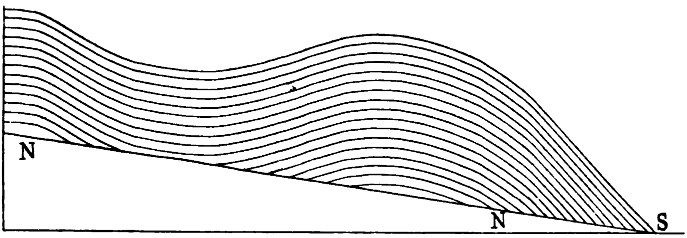

(*fig.* 5) d'une portion d'un bassin de source, ou l'on a figuré des tranches, une source S et une nappe N.

Plus la source est importante, plus son bassin a d'étendue, et plus loin se prolongent les pentes diverses de la nappe; plus grand est le nombre de tranches coupées et de dissolutions mêlées; plus les proportions des éléments variables, comme l'acide nitrique et le bicarbonate de chaux, tendent vers des valeurs constantes. Quand on compare la faible hauteur de terrain qui suffit pour emmagasiner les infiltrations d'une année à la hauteur bien plus considérable des points culminants de la nappe au-dessus de la source, on conçoit que cette nappe reçoive et mêle des infiltrations datant de saisons et même d'années différentes, et qu'ainsi les variations de l'intensité de la nitrification et de la formation du bicarbo-

nate de chaux se fondent dans le mélange final qui constitue l'eau de source.

Quand le relief du bassin d'une source est accidenté, et c'est le cas général, les distances que les infiltrations ont à parcourir pour se rendre à la nappe sont d'autant plus diffé-

Fig. 6.




rentes que les dénivellations sont plus accentuées, ainsi qu'on le voit dans la *fig.* 6.

En conséquence, les âges des dissolutions arrivant en même temps dans la nappe sont plus variés, et l'unification de constitution des eaux s'en trouve mieux assurée.

Le défaut d'homogénéité dans le terrain tend à produire le même effet : on sait que de menus débris de roches retiennent, après ressuyage, des quantités d'eau très différentes, selon leurs dimensions. Du sable grossier qui traverse les mailles d'un tamis de $1^{mm}$, mais ne passe pas à travers celles de $0^{mm},5$, retient environ 3 pour 100 de son poids; cette proportion s'élève à mesure que le sable devient plus fin, et monte jusqu'à 15-18 pour 100 quand il est mêlé d'argile, sans toutefois cesser d'être perméable. Ainsi, sous une même épaisseur, un terrain graveleux contient quatre, cinq, six fois moins d'eau qu'un terrain sablo-argileux, c'est-à-dire que les infiltrations s'y meuvent quatre, cinq, six fois plus vite. Si donc le bassin d'une source est formé en certains points d'éléments grossiers, en d'autres d'éléments fins, les dissolutions sortant en même temps de la couche végétale descendront avec des vitesses inégales et gagneront la nappe à des époques différentes, en d'autres termes, celles qui atteindront la nappe en même temps remonteront à des époques différentes.

En résumé, dans les terrains sableux, le déplacement systématique des infiltrations, leur mélange partiel pendant leur descente, l'inclinaison de la nappe souterraine, les accidents du relief du sol et le défaut d'homogénéité sont autant de conditions qui tendent à unifier la constitution minérale des eaux des grandes sources.

Le type de terrain envisagé jusqu'ici n'est pas le plus répandu, ni le plus propre à fournir les sources importantes, les seules que j'étudie, parce qu'elles sont seules recherchées pour l'alimentation des villes. Les grands réservoirs d'eaux souterraines se trouvent, comme on sait, dans les massifs de roches fissurées, dont le régime hydrologique ne ressemble guère à celui que je viens de décrire; autant l'un est simple et se prête à l'analyse des mouvements de l'eau, autant l'autre est varié et échappe à la description. Mais ces différences n'empêchent pas le mélange des dissolutions formées à des époques très variées d'être encore réalisé dans les terrains fissurés.

Il faut remarquer d'abord qu'un massif fissuré qui alimente une source importante s'élève au-dessus d'elle à une altitude considérable, témoin le plateau d'où sortent les eaux de la Vanne, ce qui lui permet d'emmagasiner les infiltrations d'un assez grand nombre d'années. Il les répartit entre ses assises, dans les fissures, les canaux, les bassins, en un mot dans les vides dont il est criblé de toute part. Ces vides, de formes et de dimensions indéfiniment diverses, sont évidemment associés en séries, de manière à former, de la surface du terrain à la source, les chemins les plus variés, les uns plus courts et plus directs, la plupart très longs et accidentés de toutes les façons, aboutissant tous à une canalisation ramifiée terminée par la source. Il n'y a plus ici de nappe souterraine continue; elle est remplacée par des bassins et des canaux situés à des niveaux différents et communiquant entre eux. Mais, quelle que soit la complication d'un tel appareil, le régime hydrologique, une fois établi, y demeure constant; je veux dire que les chemins tracés ne changent pas, au moins dans l'espace de quelques années; quel que soit le mode de logement des eaux, qu'elles occupent les interstices de matériaux pulvéru-

lents, ou mouillent des fissures, ou dorment dans des creux petits ou grands, leur déplacement progressif s'effectue néanmoins à chaque infiltration nouvelle; par conséquent elles séjournent dans le terrain aussi longtemps qu'il est nécessaire pour leur épuration; de plus, le mélange des dissolutions différentes effectué pendant leur parcours, la variété des routes qu'elles suivent, les différences de niveaux dans la canalisation dernière qui les reçoit, les accidents du relief du sol sont cause que des infiltrations produites au cours d'une longue période de temps arrivent en même temps à la source; en sorte que l'unification de la constitution des eaux tend à se réaliser dans un terrain fissuré comme dans un terrain sableux.

Je ne terminerai pas ce Chapitre sans faire observer que tous mes raisonnements supposent qu'une source tire son alimentation d'un vaste terrain situé au-dessus d'elle et pénétré à la fois par les infiltrations des pluies et des gaz de l'atmosphère. Les eaux sont alors assujetties à des mouvements, simples dans les terrains sableux, compliqués dans les terrains fissurés, mais se réduisant dans tous les cas à ces déplacements méthodiques sur lesquels j'ai fait reposer leur épuration et leur homogénéité. Mes démonstrations ne s'appliquent ni aux petites sources, ni aux eaux artésiennes, encore moins aux eaux minérales. Les bassins des petites sources sont trop exigus pour jouer le rôle de régulateurs. Les eaux artésiennes ont expulsé les gaz des couches perméables qui les emmagasinent; elles obéissent dès lors à des pressions qui leur font suivre les chemins de moindre résistance; en de telles conditions, il ne peut plus être question de déplacements méthodiques, au moins dans la couche de terrain proprement artésienne. Quant aux eaux minérales, leur parcours dans les profondeurs est encore plus ignoré que celui des eaux artésiennes; elles échappent encore mieux aux considérations théoriques que je viens de présenter.

Revenant maintenant aux faits acquis dans les précédents Chapitres, relativement à la constitution à peu près constante et indépendante des débits observée soit dans les eaux de la Vanne et de la Dhuis, soit dans les eaux de rivière en l'absence

de la végétation et des ruissellements, on voit de suite que, pour les expliquer, il suffit d'admettre que les sources de la Vanne et de la Dhuis sont de vraies sources ; il suffit d'appliquer au bassin entier d'une rivière les considérations dont le bassin d'une seule source a été l'objet dans ce Chapitre.

## V.

### L'ACIDE NITRIQUE ET LA CHAUX DANS LES EAUX DES SOURCES DE L'AVRE.

Le 8 mars 1895, un premier dosage de l'acide nitrique et de la chaux dans l'eau de l'Avre me donnait :

Acide nitrique.... 11mgr,87 | Chaux........... 87mgr,6

Un second dosage, fait le 4 avril, réduisait ces chiffres aux suivants :

Acide nitrique.... 6mgr,67 | Chaux........... 66mgr,6

Pendant que survenaient ces grandes variations, les titres nitrique et calcique restaient à peu près constants dans les eaux de la Vanne et de la Dhuis; je résolus dès lors de suivre de près les variations de ces titres dans l'eau de l'Avre, et j'en vins bientôt à y faire des dosages hebdomadaires.

Le Tableau suivant présente tous les résultats obtenus du 8 mars 1895 au 29 avril 1896.

| Dates. | | Acide nitrique. | Chaux. |
|---|---|---|---|
| | | mgr | mgr |
| 1895 | 8 mars | 11,87 | 87,6 |
| » | 4 avril | 6,67 | 66,6 |
| » | 16 » | 8,57 | 76,4 |
| » | 23 » | 10,21 | 81,5 |
| » | 29 » | 10,59 | 84,1 |
| » | 10 mai | 9,51 | 80,2 |
| » | 17 » | 10,78 | 87,8 |
| » | 24 » | 11,40 | 88,7 |
| » | 31 » | 11,15 | 87,7 |

| Dates. | | Acide nitrique. | Chaux. |
|---|---|---|---|
| | | mgr | mgr |
| 1895 | 12 juin | 11,75 | 89,8 |
| » | 18 » | 12,17 | 91,7 |
| » | 25 » | 12,29 | 92,4 |
| » | 2 juillet | 12,56 | 92,7 |
| » | 9 » | 12,41 | 93,5 |
| » | 16 » | 12,65 | 94,2 |
| » | 23 » | 12,80 | » |
| » | 30 » | 12,49 | 94,2 |
| » | 6 août | 11,78 | 91,8 |
| » | 13 » | 11,25 | 90,7 |
| » | 20 » | 11,54 | 92,1 |
| » | 27 » | 11,40 | 93,2 |
| » | 3 septembre | 12,27 | 93,5 |
| » | 10 » | 12,63 | 93,7 |
| » | 17 » | 12,57 | 95,9 |
| » | 25 » | 12,39 | 93,6 |
| » | 2 octobre | 12,61 | 94,6 |
| » | 9 » | 12,64 | 95,1 |
| » | 16 » | 11,98 | » |
| » | 23 » | 11,92 | 92,6 |
| » | 30 » | 12,21 | 95,0 |
| » | 5 novembre | 11,84 | » |
| » | 13 » | 11,84 | 93,8 |
| » | 20 » | 10,59 | 90,9 |
| » | 27 » | 10,90 | 90,0 |
| » | 4 décembre | 10,17 | 87,0 |
| » | 11 » | 10,51 | 86,2 |
| » | 18 » | 10,24 | 86,4 |
| 1895 | 26 » | 10,40 | » |
| 1896 | 2 janvier | 10,20 | 78,4 |
| » | 8 » | 10,01 | 78,5 |
| » | 15 » | 10,38 | 83,8 |
| » | 22 » | 10,07 | 82,9 |
| » | 29 » | 9,84 | 82,4 |
| » | 5 février | 10,04 | 84,5 |
| » | 12 » | 10,75 | 84,7 |
| » | 19 » | 10,53 | 86,0 |
| » | 27 » | 9,85 | 83,9 |
| » | 4 mars | 10,04 | 83,1 |
| » | 11 » | 8,90 | 80,5 |
| » | 18 » | 8,08 | 73,2 |

| | Dates. | Acide nitrique. | Chaux. |
|---|---|---|---|
| | | mgr | mgr |
| 1896 | 25 mars.................. | 8,74 | 76,1 |
| » | 1 avril.................. | 9,84 | 83,0 |
| » | 8 » .................. | 8,28 | 78,8 |
| » | 15 » .................. | 9,15 | 83,1 |
| » | 22 » .................. | 7,96 | 78,1 |
| » | 29 » .................. | 8,27 | 80,5 |

Voici les titres moyens et les plus grands écarts au delà ou en deçà :

| | Acide nitrique. | Chaux. |
|---|---|---|
| | mgr | mgr |
| Titres moyens.. ............... | 10,84 | 86,3 |
| Plus grands écarts au-dessus des titres moyens................ | + 1,96 | + 9,6 |
| Plus grands écarts au-dessous des titres moyens................ | — 4,17 | —19,7 |

Le plus grand écart pour l'acide nitrique est à peu près de $\frac{4}{10}$ du titre moyen, et, pour la chaux, de $\frac{2,3}{10}$. L'un et l'autre dépassent beaucoup ceux que j'ai trouvés pour les eaux de la Vanne et de la Dhuis.

Voici encore d'autres nombres concernant les débits des sources et les titres correspondants :

| | Dates. | | Débits. | Acide nitrique. | Chaux. |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | litres | mgr | mgr |
| Débits les plus forts........ | 1895 | 4 avril...... | 1436 | 6,67 | 66,6 |
| | » | 10 mai....... | 1296 | 9,51 | 80,2 |
| Débits les plus faibles...... | 1895 | 16 octobre.... | 792 | 11,98 | » |
| | » | 5 novembre.. | 739 | 11,84 | » |
| | » | 4 décembre.. | 792 | 10,17 | 87,0 |

Lorsque nous avons comparé les titres nitriques et calciques des eaux de la Vanne et de la Dhuis aux débits des sources, nous n'avons trouvé entre eux aucune relation apparente; il n'en est plus ainsi pour les eaux de l'Avre; sans être mathématiquement en raison inverse, les titres et les débits varient en sens contraires. Le plus fort débit, observé le 4 avril 1895, correspond précisément au moindre titre, et l'on

peut constater, d'une manière générale, que les titres se sont élevés pendant la période estivale (mai-octobre), qui a été celle des débits moyens ou faibles, et abaissés pendant la saison froide (novembre-avril), période de débits plus élevés.

Les graphiques (*fig.* 7 et 8) construits en prenant les titres

Fig. 7.

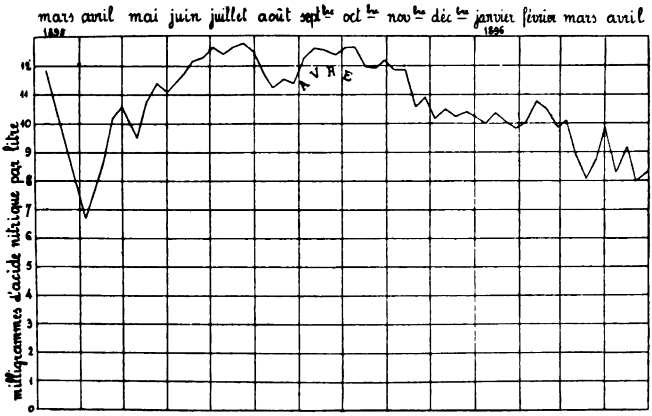
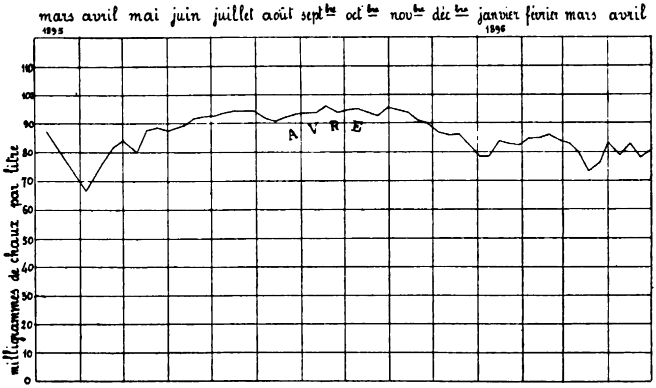



Fig. 8.




pour ordonnées et les temps pour abscisses sont très instructifs :

On remarque dans le graphique des titres nitriques une

grande dépression le 4 avril, qui pourrait bien être la conséquence du dégel survenu en mars, après les grands froids de février. Une dépression moindre, mais considérable encore, se voit en mars et avril 1896, à la suite des pluies abondantes qui ont fait déborder la Seine, à Paris, vers le 15 mars; on en trouve encore une en août, après un mois de juillet qui a été le plus humide de l'année, à Verneuil ($87^{mm}$).

On remarque encore une similitude frappante entre le graphique des titres nitriques et celui des titres calciques, similitude à laquelle on n'a pas été préparé par les graphiques analogues fournis par la Vanne et la Dhuis, où l'on ne peut saisir aucun rapport entre les quantités correspondantes d'acide et de chaux. Non seulement l'allure générale des deux graphiques de l'Avre est la même, mais encore leur concordance se manifeste souvent dans les moindres détails.

Ainsi, l'eau de l'Avre diffère, sous plusieurs rapports essentiels, de celles de la Vanne et de la Dhuis :

Les quantités d'acide nitrique et de chaux y sont en relation avec les débits des sources; elles diminuent quand les débits augmentent, et augmentent quand les débits diminuent; les sources de la Vanne et de la Dhuis sont exemptes de toute relation entre les titres et les débits;

Les variations des quantités d'acide nitrique et de chaux sont beaucoup plus importantes dans l'eau de l'Avre que dans celles de la Vanne et de la Dhuis;

Les quantités d'acide et de chaux ne sont plus indépendantes les unes des autres dans l'eau de l'Avre, comme dans les eaux de la Vanne et de la Dhuis; elles sont, au contraire, liées par une remarquable concordance de leurs variations.

Je ne trouve à ces différences si manifestes qu'une seule explication :

L'eau de l'Avre doit être un mélange, en proportions très variables, de deux sortes d'eaux :

L'une, de même genre que celles de la Vanne et de la Dhuis, serait fournie par les infiltrations des pluies et leurs déplacements successifs dans les terrains qui constituent son bassin; elle serait pure; ses titres nitrique et calcique, peu

variables, s'élèveraient au moins jusqu'aux plus hautes valeurs trouvées par mes analyses :

| | mgr |
|---|---|
| Acide nitrique | 12,8 |
| Chaux | 95,1 |

L'autre eau contiendrait beaucoup moins d'acide et de chaux; sa proportion dans le mélange augmenterait à la suite des pluies, diminuerait à la suite des sécheresses.

Les faits observés s'accordent très bien avec cette hypothèse :

Il est bien évident, d'abord, que la baisse des titres sera d'autant plus rapide, d'autant plus marquée, que l'eau pauvre arrivera aux sources en moins de temps et en plus grande abondance; inversement, les titres se relèveront d'autant plus que la proportion de l'eau pauvre sera plus faible; ils atteindront leurs valeurs les plus hautes, si l'apport d'eau pauvre devient nul. Ainsi sont expliqués à la fois le rapport inverse entre les titres et les débits, et la grande amplitude des variations des titres. Quant à la concordance entre les allures des graphiques nitrique et calcique, elle résulte encore de l'hypothèse, mais, pour s'en bien rendre compte, il faut y regarder de plus près. Si l'eau riche et l'eau pauvre avaient des titres nitrique et calcique invariables, il est incontestable que, dans tous leurs mélanges, les deux titres s'élèveraient ou s'abaisseraient en même temps, en raison des proportions relatives des deux eaux; les variations seraient toujours de même sens, toujours concordantes. Mais les titres ne sont pas absolument constants dans ces eaux; ils y éprouvent des variations de l'ordre de celles que j'ai trouvées dans les eaux de la Vanne et de la Dhuis; par conséquent, les variations des titres dans les mélanges ne dépendent pas seulement des proportions des deux eaux, mais encore des variations de titre qui leur sont particulières. Si la différence entre les proportions des deux eaux est suffisamment grande, son effet l'emporte sur celui des variations de titres particulières, et les variations dans les mélanges sont alors concordantes; c'est ce qui explique la similitude d'allure des deux graphiques : au cours d'une

année, sous l'influence des pluies et des sécheresses, le rapport entre les volumes des deux eaux dans les mélanges varie entre des limites tellement écartées que les variations de titres qui lui sont dues couvrent les variations propres à chaque eau. Mais, dans les détails des graphiques, la concordance peut fort bien faire défaut; par exemple, entre deux prises d'eau successives, si la proportion des deux eaux est restée constante, les variations propres à chaque eau régleront seules les variations dans le mélange, et celles-ci seront discordantes, quand celles-là seront de sens contraire. Mais on peut constater, par l'étude des deux graphiques, que ce cas a été assez rare; presque partout on y voit les deux titres varier, d'une semaine à la suivante, dans le même sens.

On voit que l'hypothèse d'après laquelle l'eau de l'Avre serait un mélange de deux sortes d'eaux, l'une comparable à celles de la Vanne ou de la Dhuis, l'autre particulièrement pauvre en nitrates et bicarbonate calcaire, explique si bien les faits observés qu'il est difficile de ne pas en faire la réalité. La question se pose donc, au point de vue de la salubrité, de savoir d'où vient l'eau pauvre. Serait-ce une eau de vraie source, filtrée et épurée, comme celle qui proviendrait de terrains dont la surface, occupée par des landes, des bois, serait peu propice à la nitrification et à la formation du bicarbonate de chaux? En ce cas, les deux eaux, différant seulement par leurs titres nitrique et calcique, auraient des régimes semblables; leurs débits s'élèveraient ou s'abaisseraient parallèlement, sous l'influence des mêmes conditions climatériques; on ne verrait pas, dans leurs mélanges, les titres et les débits varier en sens inverses; on ne verrait pas non plus, dans les graphiques nitrique et calcique, ces variations brusques et considérables qui accusent d'autres variations aussi brusques, aussi considérables, dans le rapport entre les débits des deux eaux.

Il est beaucoup plus probable que l'eau pauvre est simplement de l'eau de ruissellement rapidement absorbée en certains lieux et arrivant aux sources peu de temps après son absorption. La relation inverse entre les débits et les titres, la grande étendue et la rapidité des variations de ces titres

s'expliquent très bien par l'abondance subite des ruissellements pendant les dégels et les pluies prolongées; cette abondance, qui se produit surtout pendant la saison froide, explique encore la baisse générale des titres observée l'hiver, et leur relèvement pendant l'été.

Je ne veux pas quitter ce sujet sans faire observer que ni les expériences bien connues de M. Feray ni mes analyses ne démontrent que les ruissellements souillent effectivement les eaux souterraines qui sont le principal aliment des sources captées. Il n'est pas dit que ces ruissellements rencontrent des germes nocifs à la surface des terrains qu'ils lavent; s'ils en rencontrent, peut-être les abandonnent-ils dans les terrains sableux placés sur leur chemin. Mais, quoi qu'il en soit, on reconnaîtra que les résultats de mes analyses sont moins satisfaisants pour l'Avre que pour la Vanne et la Dhuis; et, s'il m'était permis d'avoir un avis sur le degré relatif de pureté des eaux conduites à Paris, je l'exprimerais en disant que je continuerai à boire l'eau de la Vanne et celle de la Dhuis, sans aucune inquiétude, telles qu'elles sont distribuées, et que je voudrais maintenant ne boire l'eau de l'Avre qu'après son passage dans un bon filtre.

Je rapporterai, en terminant, une observation faite au cours de toutes ces études. J'ai déjà dit que j'emploie, pour un dosage d'acide nitrique, $4^{lit}$ d'eau réduits par l'action de la chaleur au volume de quelques centimètres cubes. Quand j'opère avec l'eau de l'Avre, je puis toujours poursuivre et achever la concentration dans un même ballon d'environ $2^{lit}$, malgré la formation du précipité de carbonate de chaux; ce précipité est toujours plus ou moins jaune, ainsi que l'extrait sec qui contient les nitrates. L'eau de la Dhuis est, le plus souvent, dans le même cas que l'eau de l'Avre; seulement le précipité et l'extrait sec sont de nuance plus claire. Mais, parfois, il devient impossible de vaporiser les $4^{lit}$ dans un même ballon, tant sont violents les soubresauts produits par le dépôt calcaire; alors celui-ci est d'un blanc pur, et l'extrait est incolore. En pareil cas, je fais deux parts de mes $4^{lit}$, et je les fais bouillir dans deux ballons, jusqu'à formation intégrale du

précipité calcaire ; je laisse reposer, puis je décante les liquides successivement dans un troisième ballon où je les vaporise. C'est toujours ainsi que je suis obligé d'opérer quand j'ai affaire à l'eau de la Vanne; avec elle, j'ai toujours un précipité calcaire cristallin et un extrait incolore.

Ces différences tiennent à la présence de la matière humique, qui se précipite avec le carbonate de chaux, en habille les grains, les empêche de se souder et les maintient à l'état de poudre fine restant en suspension dans le liquide bouillant. J'ai constaté que $1^{cc}$ d'extrait de terreau contenant $0^{mgr},4$ de matière humique, ajouté dans chaque litre d'eau de Vanne, permet d'en vaporiser $4^{lit}$ dans un même ballon, sans danger de rupture. Ainsi, l'on peut dire que l'eau de Vanne ne contient pas trace sensible de matière humique; l'eau de la Dhuis est parfois aussi belle, mais elle contient souvent quelque trace de cette matière. On en trouve toujours dans l'eau de l'Avre, plus que dans l'eau de Dhuis, mais néanmoins en très faible quantité.

## RÉSUMÉ.

### I. — *Entraînements d'azote par les infiltrations des pluies.*

Dans la plupart des cas, l'azote ravi à la terre végétale par les infiltrations des pluies se retrouve intégralement à l'état d'acide nitrique dans les eaux souterraines provenant de ces infiltrations; les eaux souterraines se retrouvent mélangées dans la rivière qui les reçoit; leur titre nitrique moyen est donc celui des eaux de la rivière, à la condition qu'il soit déterminé aux époques où il ne peut être altéré ni par la végétation aquatique ni par les eaux de ruissellement. De telles époques se rencontrent presque toujours au cours d'un hiver.

Étudiées à ce point de vue pendant les grands froids du mois de février 1895, la Seine, au-dessus de Montereau et à Paris, l'Yonne, la Marne, l'Oise, un peu au-dessus de leurs

confluents, ont fourni des doses d'acide nitrique comprises entre $7^{mgr},85$ et $10^{mgr},03$ par litre.

Dans chaque rivière, la dose d'acide nitrique est restée à peu près la même, pendant que le débit des eaux variait dans le rapport de 2 à 1 ; on l'a retrouvée la même, un an après, lorsque la végétation aquatique et les ruissellements ont été de nouveau suspendus par le froid. On doit inférer de là que le titre nitrique moyen des eaux souterraines d'un bassin de rivière est à peu près constant, au moins pendant le cours d'une année.

Pour estimer la perte annuelle d'azote que subit le bassin d'une rivière, il faut connaître, outre le titre nitrique moyen, le volume des eaux souterraines débitées en un an. Ce volume ne peut être mesuré ni directement, ni par le débit de la rivière qui est augmenté, dans une proportion inconnue, par les ruissellements; mais, à défaut de mesure des infiltrations à la sortie de terre, on peut les estimer à leur entrée, d'après la fraction de la hauteur annuelle de pluies réellement infiltrée : cette fraction étant comprise entre $\frac{1}{5}$ et $\frac{1}{3}$ de $700^{mm}$ dans le bassin entier de la Seine, on trouve qu'en moyenne chaque hectare perd de $3^{kg},4$ à $5^{kg},6$ d'azote; et si l'on attribue la perte d'azote aux seules terres labourées, elle est alors comprise entre $5^{kg},1$ et $8^{kg},5$.

Malgré cette augmentation, elle demeure beaucoup moindre qu'on ne la supposerait d'après les déterminations publiées jusqu'ici d'acide nitrique dans les eaux de drainage. Elle varie d'ailleurs en raison de la richesse des champs, ce qui en fait une sorte d'impôt proportionnel qui pèse peu sur les terres pauvres, et ne devient sensible que pour les terres riches en état de la supporter.

## II. — *Régime nitrique dans les rivières.*

Lorsque les eaux souterraines sont devenues eaux de rivière, le titre nitrique, jusque-là à peu près constant, devient très variable, parce qu'il tombe sous la dépendance des conditions climatériques. C'est ce que démontre l'étude de ses va-

riations, pendant treize mois consécutifs, dans les eaux de la haute Seine, de l'Yonne, de la Marne et de l'Oise. Les plus hauts titres s'observent l'hiver, en l'absence de végétation et de ruissellements; les plus bas, pendant l'été, lorsque l'élévation de la température et les faibles débits de l'étiage permettent à la végétation de produire son effet maximum.

On sait que le climat est homogène dans tout le bassin de la Seine; de là la similitude des régimes de tous les cours d'eau ; de là aussi la similitude des *régimes nitriques,* mise en parfaite évidence par les graphiques construits avec les temps pour abscisses et, pour ordonnées, avec les titres nitriques trouvés du mois de février 1895 au même mois 1896 dans les eaux des rivières précitées.

Il est probable que les titres nitriques des eaux souterraines de bassins différents sont en rapport avec les richesses agricoles de ces bassins. D'après cela, les bassins de la haute Seine et de la Marne, à peu près de même richesse, le céderaient à celui de l'Yonne, qui serait à son tour inférieur au bassin de l'Oise. Il sera intéressant d'observer les titres nitriques dans d'autres bassins moins importants, aux époques où les eaux de leurs rivières représentent fidèlement leurs eaux souterraines.

## III. — *Acide nitrique et chaux dans les eaux de Vanne et de Dhuis.*

Quelques dosages d'acide nitrique m'ayant donné des résultats à peu près constants dans les eaux de la Vanne et de la Dhuis et variables dans les eaux de l'Avre, l'idée m'est venue de faire intervenir dans l'étude des eaux potables la mesure des variations de leur constitution minérale, comme moyen de distinguer les vraies sources des sources fausses, qui ne sont que des réapparitions de rivières, et des sources suspectes dont les eaux peuvent être des mélanges d'eaux pures et d'eaux impures de rivières ou de ruissellement. La constitution minérale, à peu près constante dans des sources vraies, serait variable dans les eaux des sources fausses ou suspectes.

Pour vérifier cette hypothèse, on a d'abord étudié par l'analyse les eaux de la Vanne et de la Dhuis d'une part, celles de l'Avre d'autre part, puis cherché des explications théoriques de la constance de composition des premières, de la variation de composition des secondes.

Parmi les composés divers dont l'ensemble fait la constitution minérale d'une eau de source, l'acide nitrique et la chaux sont les seuls dont la détermination intervienne utilement pour différencier les eaux de vraies sources de celles de rivière ou de ruissellement. On a donc répété de mois en mois, pendant plus d'une année, les dosages de ces deux composés, dans les eaux de la Vanne et de la Dhuis; on les a répétés chaque semaine dans celles de l'Avre.

En ce qui concerne les eaux de la Vanne et de la Dhuis, les faits suivants ressortent des analyses :

Les titres nitrique et calcique n'ont varié pendant treize mois que de $\frac{1}{10}$, en plus ou en moins, de leurs valeurs moyennes.

On n'aperçoit aucune relation entre les variations simultanées du titre nitrique dans les deux eaux ; il n'y en a pas davantage entre les variations du titre calcique; d'où la conséquence que ces variations sont indépendantes des conditions climatériques et doivent résulter d'accidents de relief ou de constitution interne propres à chaque bassin de source;

On ne trouve non plus aucune relation entre les variations du titre nitrique et celles du titre calcique dans une même eau ;

Enfin, on n'en trouve pas entre les titres nitrique ou calcique et les débits des sources; ainsi, l'observation déjà faite pour les mélanges d'eaux souterraines qui alimentaient, au mois de février 1895, la haute Seine, l'Yonne, la Marne, l'Oise, se reproduit ici pour des sources isolées.

## IV. — *Constance de composition minérale des grandes sources.*

Les résultats fournis par les eaux de la Vanne et de la Dhuis peuvent être expliqués par des considérations théoriques fort simples.

Les terrains servant de réservoirs aux sources, qu'ils soient sableux ou composés de roches fissurées, sont imbibés d'air en même temps que d'eau ; la présence de l'air sert à rompre la transmission de pressions qui tendraient à chasser les eaux dans certaines voies de moindre résistance; soustraite à ces pressions, la masse liquide opère exclusivement sa descente par déplacement méthodique des infiltrations successives. De ce mode de progression résultent deux conséquences essentielles : d'abord l'obligation pour toutes les infiltrations de demeurer dans le terrain, au contact de l'oxygène et des agents épurateurs, tout le temps nécessaire à leur purification; ensuite, l'accès simultané, dans une nappe continue ou discontinue, d'infiltrations remontant à des saisons et même à des années différentes; de là, par le mélange de ces infiltrations, l'unification de la constitution minérale des eaux.

Ces explications ne sont applicables ni aux petites sources dont les réservoirs trop peu importants ne peuvent remplir la fonction de régulateurs ; ni aux eaux artésiennes ou minérales, qui sont mues, au moins sur une partie de leurs cours, par des pressions qui excluent le déplacement méthodique.

Leur conclusion essentielle est que, pour expliquer tous les faits révélés par l'étude des eaux de la Vanne et de la Dhuis, il suffit d'admettre que les sources de ces eaux sont de vraies sources d'eaux pures et potables.

### V. — *L'acide nitrique et la chaux dans l'eau de l'Avre.*

Les déterminations de l'acide nitrique et de la chaux dans l'eau de l'Avre conduisent à une conclusion bien différente. La grande amplitude des variations des titres nitrique et calcique, la singulière concordance entre les variations de l'acide et de l'alcali, l'accroissement des titres en temps de sécheresse et leur chute rapide après les dégels et les pluies autorisent, et même rendent extrêmement probable, l'hypothèse que certaines des sources captées débitent à la fois et dans un rapport très variable des eaux de deux sortes : les unes semblables à

celles de la Vanne et de la Dhuis, provenant d'infiltrations pluviales épurées par les mêmes procédés naturels; les autres fournies par des ruissellements absorbés par des terrains trop perméables et arrivant aux sources peu de temps après leur absorption. Les sources de l'Avre dérivées à Paris ne seraient donc pas toutes, certainement, des sources *vraies,* ne débitant leurs eaux qu'après leur séjour prolongé et leur déplacement méthodique dans un sol épurateur; et mes recherches soulèveraient à nouveau la question de savoir si les eaux de l'Avre sont toujours vraiment potables, en la précisant en ces termes : les eaux de ruissellement qui envahissent certaines sources sont-elles suffisamment filtrées par les terrains qu'elles traversent, de manière à être toujours dépouillées de tout organisme malfaisant?

LA

# CONSTRUCTION DES PONTS

## EN AMÉRIQUE,

### CONFÉRENCE

FAITE AU CONSERVATOIRE DES ARTS ET MÉTIERS,
LE 17 MAI 1896,

**Par M. L. LE ROND,**
Ingénieur des Ponts et Chaussées.

MONSIEUR LE DIRECTEUR,
MESSIEURS,

Le sujet dont je vais avoir l'honneur de vous entretenir est tellement vaste, et comprend tant de matières intéressantes pour un ingénieur, que je dois forcément me borner à un exposé sommaire des principes, — essentiellement différents des nôtres, — qui régissent la construction des ponts en Amérique.

On a vu, depuis quinze ans, aux États-Unis et au Canada, de grands viaducs métalliques, du genre cantilever, franchir, en moins de trois mois, avec une ouverture principale de $150^{m}$ à $200^{m}$, des gorges larges de $300^{m}$ à $500^{m}$, dont la profondeur dépassait quelquefois $70^{m}$.

Un viaduc du genre américain, long de $500^{m}$ et haut de $49^{m}$, a même été élevé, sans échafaudages, en vingt-huit jours seulement.

Enfin le montage, sur l'Ohio, de deux grandes travées de $158^{m}$ s'est effectué dans le délai, à peine croyable, de six jours pour la première, et de quatre jours pour la seconde.

Des méthodes qui permettent d'exécuter de semblables tours de force méritent sans doute mieux qu'une banale curiosité.

L'Amérique est, il est vrai, plus peut-être qu'aucun autre pays au monde, favorable aux grandes entreprises.

La largeur des fleuves principaux, tels que le Saint-Laurent, l'Hudson, l'Ohio, le Missouri, le Mississipi, atteint souvent plusieurs kilomètres.

Le minimum d'ouverture que fixe l'État, sur ces fleuves, pour préserver les droits de la navigation, varie de $150^m$ à $250^m$ et même davantage.

L'immensité des réseaux ferrés intéressés et l'importance des besoins à satisfaire permettent d'ailleurs de ne point reculer devant des ouvrages qu'il serait insensé d'entreprendre sur les lignes secondaires que nous construisons maintenant. Qu'est-ce, en effet, qu'une dépense de deux à trois millions, eu égard au capital de premier établissement d'une *ligne Pacifique* qui traverse tout le continent américain?

Sur le pont du N. Y. C. sur le Harlem, d'autre part, il passe, par vingt-quatre heures, plus de 500 trains de voyageurs. Entre New-York et New-Jersey, le transit, dès 1891, dépassait 80 000 000 de voyageurs et 130 000 000 de tonnes de marchandises, — et il s'est encore accru depuis.

Où trouverait-on, en Europe, des nombres comparables?

Outre ces circonstances exceptionnelles, il faut tenir compte des qualités pratiques du peuple américain : de l'habitude qu'il a de ne pas engager ses capitaux à la légère, de bien étudier les problèmes à résoudre, avant de mettre la main à l'œuvre, et de construire ensuite rapidement et à bon compte, afin de recueillir immédiatement les fruits de son travail.

Or, pour pouvoir mener à bonne fin le colossal développement des voies ferrées qui ont créé la fortune de l'Amérique, il fallait, avant tout, des méthodes de construction permettant : de franchir, sans appuis intermédiaires, de très grandes ouvertures; de faire vite; et de s'affranchir, dans la plus large mesure, des coûteux transports de matériel et de personnel. Nous verrons, en outre, qu'ayant à créer de toutes pièces un art original, les ingénieurs américains se sont imposé une

dernière condition : celle de ***n'admettre, dans leurs ouvrages, que des dispositions rationnelles.***

Ce résultat n'a été complètement atteint qu'à l'aide d'un long et patient labeur. Déjà les remarquables Traités de M. Malézieux, sur les Travaux Publics, et de MM. Lavoinne et Pontzen, sur les Chemins de Fer, signalaient les nombreux avantages des systèmes américains. Mais ce n'est guère que depuis une dizaine d'années que la *Méthode américaine* s'est complètement dégagée des essais individuels, et que les moyens mécaniques et métallurgiques ont permis de réaliser pratiquement les désidérata de la théorie.

Je ne dirai que deux mots des ouvrages en charpente. Ils rendent d'inestimables services en Amérique, où ils permettent d'éviter, tout d'abord, la sujétion onéreuse des terrassements et des transports de matériaux de construction : on les rencontre sous forme de *cribs,* de *trestles,* de ponts, de

Fig. 1.



Viaduc sur le Stony Creek (C. P. R.).

viaducs, etc.... et l'on ne craint pas de franchir ainsi des portées de 60$^{m}$, à des hauteurs de près de 100$^{m}$ (*fig.* 1).

Mais, dans une revue rapide, on ne peut s'arrêter à ces ouvrages, quelque intérêt qu'ils présentent en eux-mêmes.

Les ponts métalliques, dont la construction fait l'objet de cette Conférence, offrent une grande variété en Amérique.

Au premier rang, figurent les ponts suspendus, qui ont permis, dès 1855, d'établir un pont de chemin de fer de 250$^m$ de portée, sur la rivière de Niagara. Et l'ouverture de 486$^m$, fran-

Fig. 2.



Pont suspendu et pont cantilever sur les Rapides de Niagara.

chie par l'admirable pont de Brooklyn est restée, pendant longtemps, sans égale.

Les ponts suspendus américains diffèrent des ponts similaires européens en ce qu'ils sont *rigides*. Ils se divisent, d'ailleurs, en deux catégories distinctes : les ponts à *tablier rigide,* comme le pont de Brooklyn, et les ponts à *câbles rigides,* ou en *arc renversé,* comme le pont de North-Side. Les deux systèmes ont été successivement préconisés pour le grand pont de 950$^m$ d'ouverture que l'on doit construire sur l'Hudson.

Les ponts en arc ne sont pas très répandus en Amérique, mais les spécimens qu'on en rencontre comptent parmi les plus grands et les plus beaux qu'il y ait au monde. D'une manière générale, il y a lieu de les diviser en *ponts en arc* pro-

prement dits, — dans lesquels la déformation élastique de l'arc n'est contrariée par aucun tympan rigide, — et *ponts en arche,* — dans lesquels il existe des tympans rigides. Ces derniers, qui sont presque exclusivement usités en France, ne sont en réalité que des *poutres* de forme spéciale.

Parmi les ponts *en arc,* les plus remarquables sont le pont de Saint-Louis (une arche de 158$^m$, deux de 153$^m$) construit par le célèbre ingénieur Eads, et le viaduc Washington (deux arches de 155$^m$). Dans le premier, les arcs sont encastrés; dans le second, ils sont articulés aux naissances. Il existe aussi, en Amérique, des arcs à triple articulation.

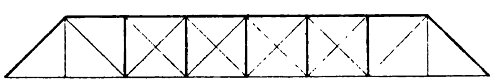
Les ponts *en arche* existants n'atteignent pas à ces dimensions. Mais on doit en construire un prochainement, à Niagara, qui aura 168$^m$ d'ouverture.

Le véritable pont américain est la *poutre articulée,* qui se compose de *membres* distincts, réunis par des *articulations.* On y distingue, d'une part, les *semelles* ou *cordes,* d'autre part, le *réseau,* composé de *tirants* et de *montants,* qui divisent la poutre en *panneaux.* Les membres sont assemblés entre eux, aux *nœuds* du système, à l'aide de *chevilles* qui leur permettent de se déplacer *librement,* les uns par rapport aux autres, sous l'influence des efforts qu'ils ont à subir. Les efforts demeurent ainsi toujours *linéaires* et *définis.*

Les deux *fermes* d'une même poutre sont en outre toujours reliées, d'une manière *complète,* à l'aide des trois contreventements : *supérieur, inférieur* et *transversal.*

On dit qu'une poutre est de *système simple,* lorsqu'elle est

Fig. 3.



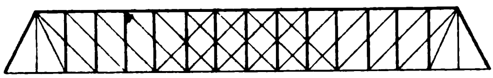
Poutre Pratt.

décomposable en un seul système de triangles ayant, deux à deux, un côté commun : exemple, la poutre Pratt (*fig.* 3).

Une *poutre multiple* est formée de la réunion de plusieurs poutres simples, dont les semelles coïncident, et dont les

nœuds sont alternés : exemple, la poutre Linville (*fig.* 4).

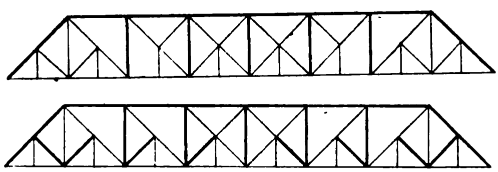
Fig. 4.



Poutre Linville.

Enfin, si l'on construit sur les panneaux d'une poutre simple, dite *primaire*, des poutres *secondaires* qui procurent au

Fig. 5 et 6.



Poutres Pettit.

*tablier* des points d'appui intermédiaires, on obtient une poutre *complexe :* exemples, les poutres Pettit (*fig.* 5 et 6).

Les poutres multiples, et surtout les poutres Linville, ont joui d'une grande faveur à une certaine époque; mais elles sont abandonnées, maintenant, parce qu'elles ne se prêtent pas à une connaissance rigoureuse des efforts, et l'on n'emploie plus guère que les poutres simples ou complexes, à grands panneaux, qui échappent complètement à cette critique.

Ainsi, les ponts américains, *articulés*, diffèrent essentiellement des ponts européens, *rivés*, puisque les premiers se composent de *membres distincts*, libres de prendre, sous l'influence de forces extérieures quelconques, la position d'équilibre qui assure le partage géométrique des efforts; dans les seconds, au contraire, toutes les parties sont *solidaires*, immuablement reliées par des rivures que l'on consolide quelquefois même à l'aide de goussets, et la déformation élastique, inévitable, entraîne forcément, en chaque point, des torsions et des flexions de nature et d'importance variables, mais qui

introduisent dans les charpentes des efforts *secondaires* inconnus.

Le *partage* et la *répartition des efforts, mathématiques* dans le premier cas, deviennent, ainsi, *essentiellement douteux* dans le second. Il est facile de démontrer, par exemple, que, dans une poutre en treillis, par suite des déformations inverses et sensiblement parallèles (allongement et raccourcissement) des semelles, les barres de treillis doivent prendre une forme doublement infléchie (*fig.* 7). Chaque point de

Fig. 7.

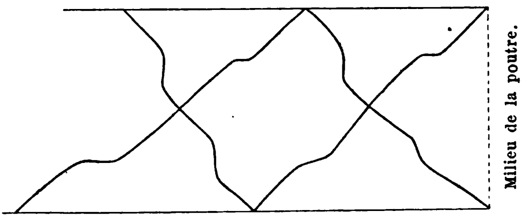



Diagramme montrant la déformation des barres d'un treillis rivé, sous une surcharge symétrique.

croisement de deux barres produit une déformation analogue; et le trouble est encore accru par suite de la fixation des points d'intersection. Il en résulte, *a priori*, une altération générale de tous les efforts calculés, la production de tensions dans certaines barres comprimées, de compressions dans certaines barres étendues; et les expériences faites dans ces dernières années sur des ponts en service par MM. Dupuy, Rabut, etc. ont montré, en effet, qu'il n'existe souvent que peu d'analogie entre les efforts réels et les efforts calculés ([1]).

On a cherché à calculer les efforts secondaires. Le professeur Winkler a montré qu'ils pouvaient, dans une poutre en treillis double, *d'exécution parfaite*, atteindre 113 pour 100 des efforts calculés. Mais on reconnaîtra que les moindres

([1]) On nous a cité, postérieurement à cette Conférence, l'exemple d'un pont de chemin de fer, en treillis sextuple, dans lequel les efforts étaient tellement bouleversés, que certaines barres, destinées à travailler à la *tension*, avaient *flambé* de 35$^{mm}$.

défauts d'ajustage ont une influence bien supérieure encore, si l'on considère qu'un allongement ou un raccourcissement atteignant un millième de la longueur d'une pièce, — et qui peut résulter soit des défauts inévitables d'ajustage, soit des variations de température pendant la construction, — suffit pour développer un effort égal à la limite d'élasticité du fer.

Quelle est, d'ailleurs, la distribution des efforts dans une rivure? Le bon sens et les innombrables ruptures de rivets — les véritables *pluies de rivets* — que l'on constate dans certains ouvrages métalliques, montrent suffisamment que les efforts dépassent souvent, dans les assemblages rivés, les limites que commande la sécurité.

La plus spécieuse des objections que l'on peut faire à l'articulation, c'est qu'elle fait dépendre la sécurité d'un ouvrage d'un organe unique : la cheville. Cette critique n'est pas soutenue par les faits : on n'a jamais vu, en Amérique, — malgré le nombre considérable d'ouvrages insuffisants et mal entretenus qu'on rencontre dans ce pays, et les accidents qu'entraîne fatalement cet état de choses, — on n'a jamais vu, dis-je, un pont s'écrouler par suite de la rupture d'une cheville.

C'est, au surplus, la conséquence naturelle de ce fait, facile à démontrer, que les efforts, dans les chevilles, sont *toujours inférieurs aux efforts calculés.*

L'articulation se prête d'ailleurs à un excès de résistance; les organes en sont massifs et donnent peu de prise à la rouille; le montage est très simple et l'entretien facile. Enfin, l'économie, par rapport aux constructions rivées, est *évidente,* puisque, dans les pièces étendues, la section *nette* n'est autre que la section *brute.*

En regard de ces avantages, il est évident que la rivure a tous les défauts contraires, car elle entraîne : une réduction de la section dans les assemblages, qu'elle affame; l'emploi de sections composées, offrant le flanc à toutes les causes internes d'affaiblissement, et ne se prêtant qu'à un entretien superficiel; un montage lent et fastidieux; enfin une consommation à la fois excessive et irrationnelle de métal, dont l'effet, loin de contribuer à la résistance des ouvrages, ne peut, au

contraire, que lui nuire, — en rejetant sur les points faibles, c'est-à-dire sur les *assemblages*, une part d'autant plus considérable du travail de la déformation.

Les seuls avantages des constructions rivées sont leur rigidité propre et la solidarité de toutes leurs parties. Ces qualités les font employer exclusivement, en Amérique, pour les ponts de chemins de fer de petite portée (moins de $30^m$ à $45^m$). Il est même d'usage, dans ces cas, d'employer les treillis multiples et, de préférence, les poutres pleines, en leur donnant la plus grande masse possible.

Dans *tous les autres cas*, c'est-à-dire pour les ponts de chemins de fer de portée supérieure, et pour les ponts-routes en général, les poutres articulées sont seules usitées.

Les ingénieurs américains emploient deux sortes de poutres dans leurs ouvrages : les poutres *indépendantes*, et les poutres *dépendantes mais non continues*. Ils ne font *jamais* usage des poutres continues, parce que, dans ce système, la moindre erreur ou la moindre variation, en ce qui concerne le niveau des appuis, trouble la répartition des efforts.

Les poutres indépendantes sont, de beaucoup, les plus répandues et atteignent couramment, en Amérique, des portées qui, en Europe, sont absolument exceptionnelles [1].

On peut en donner les exemples suivants :

Dans le système Pratt, d'abord, le pont de Hawkesbury comprend sept travées de $126^m,80$ (*fig.* 8). Une travée se compose, en tout, de treize panneaux, dont la longueur est ainsi de près de $10^m$.

Le système Pratt double, ou Linville, qui, comme je l'ai dit antérieurement, a été, pendant longtemps, le plus en faveur, est représenté par d'innombrables ouvrages. Dans la vallée du Missouri, la plupart des ponts appartiennent à ce système et se composent, en général, de travées principales de $122^m$, au

---

[1] La plus grande travée libre qu'il y ait en Europe est celle de $150^m$ du pont de Kuilenburg. Aucune autre n'approche d'ailleurs de cette portée. Il ne faut pas confondre avec des *poutres* les *arcs* de Garabit, du Douro, etc.

nombre de deux à quatre, encadrées entre des viaducs d'accès. Tels sont les ponts de Plattsmouth, de Bismarck, de Randolph, de Sibley, de Sioux-City, etc.... Pour certains de ces ponts, la

Fig. 8.



Pont sur la rivière de Hawkesbury.

durée totale de la construction, y compris les fondations à l'air comprimé, n'a pas atteint trois cents jours.

La plus grande application du système Linville se trouve au pont de Cairo, sur l'Ohio. Cet immense ouvrage, le plus long qu'il y ait au monde (3218$^m$), comprend deux travées Linville de 158$^m$ et sept de 122$^m$, encadrées entre des travées Pratt de moindre portée. Avec les trestles en charpente qui y donnent accès, la longueur totale est de 6235$^m$.

Les piles de ce pont sont fondées à 23$^m$ de profondeur; il dégage 16$^m$,15 au-dessus des crues, qui atteignent 15$^m$,55.

De la base des fondations au sommet des poutres, la hauteur totale de l'ouvrage est ainsi de 76$^m$, soit 15$^m$ de plus que n'ont les tours de Notre-Dame.

Le système Pratt complexe, ou système Pettit, est le plus répandu maintenant, et comporte les plus grandes travées libres qu'il y ait dans le monde entier.

Les ponts du Havre de Grâce, des Marchands de Saint-Louis, de l'Ohio Connecting Railway, de Wheeling ont tous des travées de 158$^m$ à 160$^m$.

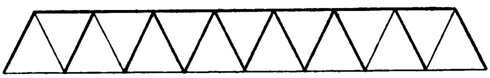
Le pont de Cincinnati et Covington a une travée de 165$^m$ comprise entre deux de 148$^m$.

Enfin, le pont de Louisville et Jeffersonville a six travées, dont trois de 167$^m$.

Sauf les deux premiers, ces grands ponts sont situés sur l'Ohio.

Les systèmes triangulaires (*fig.* 9) sont moins répandus. La plus remarquable application qui en ait été faite, à des

Fig. 9.



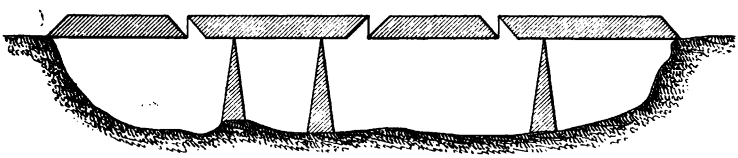
Poutre de système triangulaire simple.

poutres libres, se trouve au pont de Henderson, également sur l'Ohio, dont la travée marinière a 160$^m$.

Les poutres à travées *solidaires mais discontinues*, ou ponts *cantilevers* (*poutres à consoles*), constituent la plus remarquable invention moderne des ingénieurs américains.

Un pont cantilever se compose d'une suite de travées, alternativement continues et discontinues (*fig.* 10). Les travées

Fig. 10.



Système cantilever complet.

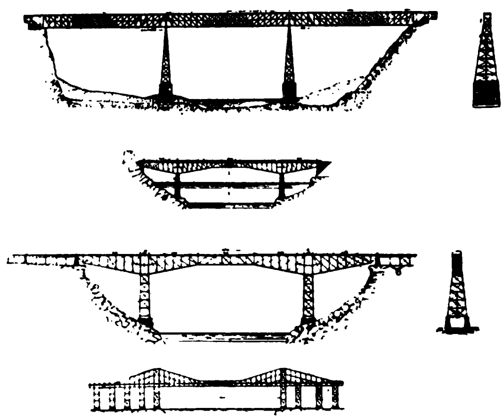
continues se prolongent au-delà de leurs appuis, en forme de consoles (*fig.* 19) en porte à faux, qui supportent librement, à leurs extrémités, des travées indépendantes, dites *suspendues*. Les travées discontinues se composent ainsi d'une *travée*

*suspendue*, supportée, soit par deux consoles, soit par une console et un appui.

L'origine des ponts cantilevers *actuels* remonte, sans aucun doute, à la construction du pont de Saint-Louis, en 1870, par le célèbre ingénieur Eads. Les arcs de ce pont, dont la portée est de 153$^{m}$ et 158$^{m}$, furent montés en porte à faux, sans le secours d'échafaudages, à l'aide de chaînes de suspension formées de barres à œils. Les consoles du pont de Saint-Louis sont les plus longues qui aient été montées en porte à faux, avant la construction des grands ponts cantilevers de Tyrone, de Red-Rock et de Memphis, en Amérique, et du Forth, en Angleterre.

Et le *premier* pont cantilever est le viaduc sur le Kentucky River (*fig.* 11 et 12), construit en 1876 sur le Cincinnati-

Fig. 11, 12, 13, 14, 15 et 16.



Ponts cantilevers divers.

Southern R. R., par M. Shaler Smith, sous la direction de M. G. Bouscaren.

Les avantages économiques de l'interposition d'articulations dans les poutres continues avaient bien été signalés par Culmann, dès la première édition de sa Statique graphique. Mais ce furent des considérations d'ordre tout différent qui ame-

nèrent M. Shaler Smith à créer, en 1874-1876, au viaduc sur le Kentucky River, le premier système cantilever.

Voulant profiter de l'existence d'ancrages en maçonnerie, antérieurement destinés à la construction d'un pont suspendu, pour monter le viaduc en porte à faux, M. Shaler Smith devait, naturellement, recourir à une poutre continue. Et il fut amené à y introduire des articulations, pour éviter les efforts secondaires que n'aurait pas manqué de produire la dilatation des tours métalliques, de $54^m$ de hauteur, qui supportent la poutre.

Les ponts cantilevers, en tant que ponts à travées solidaires, pèsent, *a priori*, et toutes choses égales d'ailleurs, moins lourd que les ponts à travées indépendantes. On peut, en outre, par un choix judicieux de la position des articulations, réduire à un minimum l'ensemble des moments fléchissants et, par conséquent, le poids de la construction.

Mais ils présentent un avantage beaucoup plus précieux : la facilité de montage en porte à faux, qui a permis de franchir,

Fig. 17.



Fermeture de la travée de $200^m$ du pont cantilever de Red-Rock, sur le Colorado.

sans difficulté, des obstacles jusqu'alors insurmontables, comme les Rapides de Niagara, les bras de mer de Saint-John et du Firth of Forth.

Dans les ponts américains, ce montage s'exécute avec une rapidité et une élégance dont on n'a pas idée dans le reste du monde : grâce à l'emploi de poutres articulées et d'appareils de réglage d'une grande sensibilité, il suffit, comme le montre la *fig.* 17, de neuf hommes pour fermer une travée cantilever de 200$^m$; à savoir : six hommes aux appareils de réglage, deux aux chevilles, et un photographe pour enregistrer le succès de l'opération.

Les ponts cantilevers construits jusqu'à ce jour en Amérique sont très nombreux. Il serait trop long de parler de tous.

La forme rationnelle des consoles se rencontre déjà dans des projets de M. Macdonald (*fig.* 16) et du colonel Flad (1876); mais elle a été appliquée, pour la première fois, aux ponts du

Fig. 18.



Pont du Frazer Canyon.

Frazer Canyon (*fig.* 13 et 18) et de Niagara-Falls (*fig.* 14, 15 et 19), par M. C.-C. Schneider.

Le second de ces ouvrages, qui a une hauteur de 60$^m$ et se compose d'une travée de 151$^m$, comprise entre deux travées de 63$^m$, fut *entièrement construit*, y compris le travail aux ateliers, du 11 avril 1883 au 6 décembre de la même année.

La *fig.* 19 montre la console en porte à faux de la rive sud, achevée.

Parmi les plus grands ponts cantilevers, il y a lieu de citer

Fig. 19.



Console du pont de Niagara.

ceux de Poughkeepsie, de Tyrone, de Red-Rock et de Memphis.

Le viaduc de Poughkeepsie (*fig.* 20) franchit l'Hudson à

Fig. 20.



Pont de Poughkeepsie, sur l'Hudson.

l'aide de sept travées, dont deux ont 160$^{m}$ et trois 167$^{m}$ d'ou-

verture. La hauteur du viaduc au-dessus de l'eau est de $64^{m}$ (plus que la hauteur des tours de Notre-Dame). Des rails à la fondation, la hauteur totale est de $100^{m}$.

C'est un magnifique ouvrage, dont le dessin est d'ailleurs unique dans son genre.

Le viaduc de Tyrone, qui a $71^{m}$ de hauteur, a une ouverture centrale de $168^{m}$, comprise entre deux travées de $68^{m}$.

Le pont de Red-Rock ou des Aiguilles, sur le Colorado, a une travée centrale de $200^{m}$ (*fig.* 17).

Enfin, le grand pont de Memphis (*fig.* 21) comprend deux travées de $190^{m}$ et une de $241^{m}$; et les fondations, faites à l'air

Fig. 21.



Fermeture de la travée de $241^{m}$ du pont de Memphis, sur le Mississipi.

comprimé, ont atteint la cote $32^{m},92$ au-dessous du niveau de l'eau, dépassant ainsi la profondeur des fondations du pont de Saint-Louis. Pendant vingt-cinq jours, pour une des piles, et vingt-huit jours pour une autre, on avait travaillé sous une pression de plus de $30^{m},50$ d'eau.

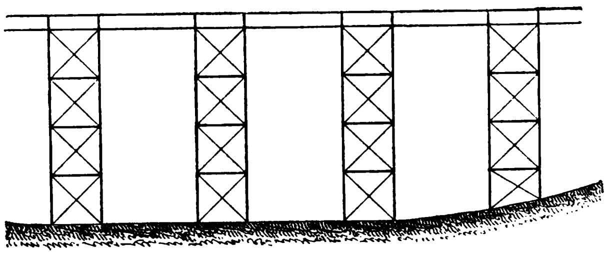
A New-York, à la Nouvelle-Orléans et ailleurs, des ponts cantilevers plus gigantesques encore sont projetés ou en exécution : le plus important est celui sur l'Hudson, dont l'ouverture centrale dépasserait $700^{m}$.

En France, le système cantilever est représenté par la passerelle de Passy, par le pont Mirabeau et le pont de Tolbiac.

Les viaducs ne sont pas les moins étonnants des ouvrages américains.

Un viaduc américain (*fig.* 22) se compose de tours équi-

Fig. 22.



Viaduc *américain*.

distantes, supportant une succession de petites travées qui sont presque toujours rivées.

Dans les viaducs de faible hauteur, on donne aux tours un espacement égal à la largeur même de ces tours; on les écarte à mesure que la hauteur augmente, sans que leur espacement dépasse une trentaine de mètres, pour des hauteurs voisines de $100^m$.

Les *fig.* 14, 15 et 22 représentent ces tours, dont les colonnes n'ont aucun fruit longitudinal, mais ont un fruit transversal qui est uniformément de $\frac{1}{6}$.

C'est en Amérique que l'on trouve les plus hauts viaducs qu'il y ait au monde.

Le viaduc de Kinzua (*fig.* 23), sur le chemin de fer de l'Érié, a $624^m$ de long et $92^m$ de hauteur.

Le viaduc de la Loa, au Brésil, viaduc de système américain construit par des ingénieurs anglais, a $243^m$ de longueur et $102^m$ de hauteur.

Le viaduc de Pécos, sur le Southern Pacific, a $664^m$ de longueur et $98^m$ de hauteur; il comporte, en son centre, un système

cantilever composé d'une travée de 86$^m$, comprise entre deux travées de 54$^m$.

Fig. 23.



Viaduc de Kinzua.

Ces hardis viaducs se montent entièrement sans échafaudages.

Les variétés de ponts mobiles sont trop nombreuses en Amérique pour qu'il soit possible de s'y arrêter.

On y trouve, en effet, des ponts-pontons, des ponts-levis, des ponts pliants, des ponts à bascule, des ponts levants, des ponts tournants.

La *fig.* 24 représente le pont levant de Chicago, dont la travée mobile, longue de 40$^m$ et pesant, avec ses contrepoids, plus de 600 tonnes, s'élève ou s'abaisse, en 49 secondes, de la hauteur de 45$^m$.

Les grandes travées tournantes, en équilibre sur une pile centrale (*fig.* 25), atteignent jusqu'à 160$^m$ de longueur, et pèsent jusqu'à 2000 tonnes. C'est un spectacle propre à con-

fondre d'étonnement, que de voir de semblables masses évo-

Fig. 24.



Pont levant de Chicago.

luer docilement, sans secousse et sans bruit, sous la direction

Fig. 25.



Travée tournante de 152ᵐ du pont d'Arthur Kill.

d'un seul homme. Les machines motrices sont à vapeur, hydrauliques, pneumatiques, ou électriques.

Nous avons passé rapidement en revue l'ensemble de la construction américaine, et il est facile de voir déjà, d'après cet exposé sommaire, quelle distance la sépare de nos habitudes européennes.

Mais, pour apprécier pleinement la différence, et pour porter sainement un jugement comparatif sur la valeur des méthodes, il est nécessaire de savoir comment sont calculées les charpentes américaines, et comment on réalise, dans la pratique, la perfection d'exécution qui semble, *a priori*, nécessaire dans de telles constructions.

Dans les calculs, d'abord, les Américains distinguent les charges vives des charges mortes. Chacun sait qu'une charge appliquée *sans mouvement*, mais *instantanément*, à une tige métallique, impose *d'abord* à cette tige un allongement, — un *travail élastique*, — double de celui qui résulterait de la même charge *statique*, et ensuite une série d'oscillations, de *vibrations*, autour de la position finale d'équilibre statique.

Quand un train entre sur un pont, à la vitesse de $60^{km}$ ou $80^{km}$ à l'heure, ou davantage, il est évident que certaines parties du pont, — les organes discontinus du tablier, par exemple, — subissent, de ce fait, des efforts qui sont presque instantanés. Dans les semelles, au contraire, les efforts se développent d'une manière plus progressive.

Les impulsions, les chocs, provenant soit des actions non équilibrées de la machine et du train à sa suite, soit des inégalités de la voie, — qui constituent ce que les Américains nomment l'*impact*, — produisent également, sur chaque partie d'un ouvrage métallique, des actions dont l'importance est évidemment variable, suivant le rôle de l'organe considéré, sa position, sa masse propre, et les dimensions du pont dont il fait partie.

Les ingénieurs américains, contrairement à nos usages, tiennent fort sagement compte de ces conditions diverses, en affectant les efforts *bruts*, obtenus par un calcul élémentaire de statique, de *coefficients d'influence*, variables, d'une part, suivant la *nature* de l'effort et, de l'autre, suivant le *rôle*, la *position* et la *masse* du membre qui y est soumis, et les *dimensions* de la charpente à laquelle il appartient.

On conçoit que l'évaluation de ces éléments divers soit chose très délicate; mais les bases de la méthode sont absolument rationnelles.

On ne saurait évidemment en dire autant de l'application aux ponts métalliques des formules allemandes, induites des expériences de Wöhler. Ces expériences ont, en effet, montré l'effet nuisible, sur les métaux, des répétitions d'efforts, *quand ces efforts dépassent la limite d'élasticité;* il est donc *absurde* d'appliquer les formules qui en dérivent à des ouvrages métalliques dans lesquels les efforts *doivent demeurer inférieurs à la limite d'élasticité.*

Par suite de leur division en grands panneaux, les ponts métalliques américains se composent d'organes peu nombreux, mais volumineux.

Le poids de certaines barres à œils atteint 2 tonnes; certains segments des membres de compression des ponts existants

Fig. 26.



Palier du pont de Memphis.

pèsent près de 30 tonnes; chacune des chevilles qui supportent la grande travée du pont de Memphis pèse $1100^{kg}$, et la *fig.* 26 montre les grandes dimensions des paliers sur lesquels elles reposent.

On ne pourrait se contenter, pour des organes d'une semblable masse, des essais rudimentaires qui sont encore considérés comme suffisants pour la construction des ponts européens.

Les ingénieurs américains ont depuis longtemps compris la nécessité de recourir à des essais complets : essais de laboratoire, d'une part, pour déterminer la *qualité des métaux* employés, essais en vraie grandeur, d'autre part, pour connaître les *propriétés des formes* des organes et contrôler la *qualité de la main-d'œuvre.* Ces essais ne se font pas seule-

Fig. 27.



Colonnes en fers Z rompues dans les ateliers de la Keystone Bridge Co.

ment sur des membres de petites dimensions : la machine de la Phœnix Iron Co., par exemple, peut essayer des membres de plus de 15$^{m}$ de longueur, exigeant un effort de rupture de plus de 1000 tonnes. Et il n'est pas une disposition, pas un détail usité dans les membres des ponts actuels, qui n'ait fait l'objet d'essais en vraie grandeur. La *fig.* 27 montre des colonnes en fers Z, après l'essai à la rupture, dans les ateliers de la Keystone Bridge Co.

Près de trente années de recherches suivies dans cette voie ont permis aux ingénieurs américains d'amasser une *immense expérience, telle que n'en possèdent les constructeurs d'aucun autre pays au monde.*

Aussi, dans les ponts actuels, non seulement la *forme*, mais même le *métal*, sont-ils appropriés au rôle de chaque organe.

Il existe des règles et des formules, déduites de longues expériences, pour proportionner toutes les parties des ponts américains; et dans les ouvrages récents, on voit faire usage, suivant les membres, de toute une gamme d'aciers dont la résistance varie depuis $40^{kg}$ jusqu'à $54^{kg}$, par exemple, la limite d'élasticité de $20^{kg},3$ à $28^{kg}$, l'allongement de 26 pour 100 à 18 pour 100, et la striction de 52 pour 100 à 36 pour 100.

On fait même varier, pour une même résistance, les qualités élastiques du métal, suivant son emploi.

Connaissant ainsi d'une manière parfaite : d'une part, les efforts, d'autre part, les propriétés des formes et des métaux, il était nécessaire, pour que la méthode américaine présentât, en pratique, les avantages théoriques dont elle se réclame, d'obtenir encore, aux ateliers, une perfection d'exécution en rapport avec la précision des calculs.

Ce résultat est maintenant complètement atteint, dans les grandes usines de construction américaines.

Les chevilles, dont le diamètre varie, dans les ponts de portées courantes, entre $0^m,10$ et $0^m,20$, n'ont, dans les œils des pièces qu'elles assemblent, qu'un jeu limite de $\frac{1}{2}$ millimètre, $\frac{1}{4}$ de millimètre, ou même moins.

Les longueurs des membres sont mesurées, d'une manière absolument indépendante de la température, par rapport à des étalons de même métal, à l'aide de méthodes aussi précises que celles que l'on emploie en géodésie. Et ces longueurs se mesurent, non pas entre les centres des œils, mais entre les *portées d'appui:* bords extérieurs des œils, dans les membres de tension; bords intérieurs dans les membres de compression.

Enfin, l'ajustage de toutes les surfaces d'assemblage se fait avec un *fini de machine*, à l'aide des machines-outils les plus perfectionnées qui existent.

Ayant pour base un principe essentiellement rationnel, la construction américaine réalise ainsi, dans tous ses détails, le développement logique et correct de ce principe.

C'est l'application la plus parfaite qui ait été réalisée, jusqu'à ce jour, des principes de la Mécanique, — et du bon sens, — à la construction des ponts métalliques.

Est-il étonnant, dès lors, que de tels ouvrages, ainsi établis avec la précision des constructions mécaniques les plus soignées, se prêtent à un montage d'une simplicité sans égale?

Les pièces arrivent sur le chantier toutes finies, graissées, et bien numérotées : pour en faire un pont, il suffit de passer les chevilles dans les œils, de mettre quelques boulons d'attente dans les trous des rivets, — peu nombreux d'ailleurs, — qui servent, par exemple, à assembler bout à bout les segments des membres de compression; et le pont peut être mis en service *avant même que l'on n'exécute aucune rivure sur le chantier*.

Le montage des travées indépendantes se fait, en général, en place, sur échafaudages.

Les travées discontinues des ponts cantilevers se montent,

Fig. 28.



Montage du pont de Lachine, sur le Saint-Laurent.

au contraire, en porte à faux (*fig.* 17, 19, 21 et 28), sans le secours d'aucun échafaudage.

Au pont de Red-Rock, sur le Colorado (*fig.* 17), le porte à faux de chacun des deux bras, au moment de leur jonction, était de 100$^{m}$. Nous avons vu, d'ailleurs, comme il faut peu de monde pour fermer une semblable travée américaine.

Au pont de Memphis, le porte à faux de chaque bras dépassait 120$^{m}$ (*fig.* 21).

Les viaducs américains se montent aussi sans échafaudages, et il en est qui atteignent 100$^{m}$ de hauteur.

Enfin, l'on a eu quelquefois recours au transport, par eau, de poutres préalablement montées en un endroit abrité de la rive, et que l'on venait ensuite déposer sur leurs piles.

Les sept travées de 126$^{m}$ du pont de Hawkesbury (*fig.* 8) ont été ainsi, sans accident, successivement montées et mises en place.

La plus grande travée à laquelle cette méthode ait été appliquée, est celle de 160$^{m}$ du pont sur l'Ohio Connecting Ry, qui pesait 900 tonnes, et dont le transport ne prit que dix heures.

De véritables prodiges de rapidité ont été réalisés, à l'aide de ces diverses méthodes.

Les ponts cantilevers, d'abord, en présentent de remarquables exemples, bien qu'on n'ait généralement recours à ce genre d'ouvrages qu'en des endroits où se trouvent accumulées les difficultés matérielles :

Le pont de Niagara, qui comprend une travée de 150$^{m}$ et deux de 63$^{m}$, reposant sur des tours de 40$^{m}$ de hauteur, a été monté en quatre-vingt-cinq jours.

Le pont de Saint-John, dont les travées mesurent 44$^{m}$, 145$^{m}$ et 58$^{m}$, n'a demandé que quatre-vingts jours.

Le grand viaduc de Tyrone, sur le Kentucky River, a une longueur totale de 487$^{m}$ et une hauteur de 71$^{m}$. Au centre, se trouve un système cantilever composé d'une travée principale de 168$^{m}$ comprise entre deux travées de 68$^{m}$. Le montage de cette partie de l'ouvrage n'a pris que *cinquante-six jours ;* et la construction complète du viaduc entier, y compris les fondations, le travail à l'usine et le montage, fut exécutée dans l'espace de *sept mois*.

Le viaduc de Panther-Creek, qui est du type *américain,* a

503$^{m}$ de longueur et 49$^{m}$ de hauteur : il a été monté en *vingt-huit jours*.

Mais le tour de force le plus invraisemblable est le montage, par les frères Baird, des deux grandes travées de 158$^{m}$ du pont de Cairo. Chacune de ces travées pesait en moyenne 935000$^{kg}$. *La première fut montée en six jours, la seconde en quatre jours, sans travail de nuit* (*fig.* 30).

Le montage de cette dernière commença le 30 octobre 1888, à 2$^{h}$30$^{m}$ du soir, et le 3 novembre, à 2$^{h}$50$^{m}$, il était achevé : le nombre total de *journées* payé fut de 364, soit 91, en moyenne, par jour.

Le montage comprenait l'adduction des matériaux, déposés sur la rive, à une distance d'environ 300$^{m}$.

Enfin l'on peut citer, comme fort remarquable, la mise en

Fig. 29.



Transport par eau d'une travée de 76$^{m}$,20 du pont de Jacksonville.
Vue prise 31 minutes après le départ.

place, par eau, *en trente-sept minutes seulement,* d'une travée de 76$^{m}$,20 du pont de Jacksonville, sur le Saint-John's River, en Floride (*fig.* 29).

On pourrait se demander si d'aussi surprenants résultats ne sont point achetés aux dépens de l'économie. Mais il n'en est rien.

Ainsi que je l'ai montré antérieurement, les ponts articulés pèsent *forcément* moins lourd que les ponts rivés, toutes choses égales d'ailleurs; cette différence est d'autant plus sensible que la portée augmente.

Je n'en donnerai qu'un exemple :

Le pont de Kuilenburg, en Hollande, a $150^m$ de portée; il est en fer, travaillant à $7^{kg}$ par millimètre carré; le tablier, en acier, travaille à $10^{kg}$. Ce pont, à double voie, est calculé pour une surcharge de $3000^{kg}$ par mètre courant de simple voie.

Les poutres, à semelle supérieure courbe, sont du système Linville triple, avec un surbaissement de $\frac{1}{7,5}$. Le pont pèse $14380^{kg}$ par mètre courant. Une travée à simple voie, de mêmes proportions et de même résistance, pèserait *au moins* $8000^{kg}$ par mètre courant [1].

Les grandes travées du pont de Cairo (*fig.* 30), sur l'Ohio,

Fig. 30.



Travée de $158^m$ du pont de Cairo, sur l'Ohio.

ont $8^m$ de plus ($158^m,04$). Elles sont en acier. Les efforts ne dépassent nulle part $9^{kg},1$ à la tension, et varient entre $4^{kg},8$ et $9^{kg},8$ à la compression. Le pont est à simple voie; la sur-

---

[1] Voir *les Travaux publics de l'Amérique du Nord*, Ire Partie, p. 690.

charge admise, par mètre courant, est de 4464$^{kg}$ *pour les fermes* et de 8928$^{kg}$ *pour le tablier*.

Les poutres, à semelles parallèles, sont du système Linville double, avec surbaissement de $\frac{1}{8,5}$.

Ce pont, bien que calculé pour une surcharge presque double de celle du pont hollandais, et établi d'ailleurs, à tous les égards, dans des conditions moins favorables, au point de vue de l'économie de métal, ne pèse pourtant que 5918$^{kg}$ par mètre courant.

*Les travées de Cairo pèsent donc, par mètre courant, près de deux fois et demie moins que celle de Kuilenburg, et au moins* 2000$^{kg}$ *de moins* (25 *pour* 100) *que ne pèserait cette travée, si elle était à simple voie.*

Voilà pour les poutres indépendantes.

Quant au système cantilever, employé à propos, il permet en outre de réaliser une *économie de métal* qui peut atteindre 20 pour 100, par rapport aux travées américaines indépendantes.

Si l'on ajoute à ces résultats de comparaisons indiscutables que, malgré la qualité *exceptionnelle* de la main-d'œuvre requise, le prix du kilogramme de métal pour ponts, *mis en œuvre,* ne revient pas plus cher en Amérique qu'en France, — que pour les ponts de 700$^{m}$ à 1000$^{m}$ de portée projetés à New-York, par exemple, le prix prévu est de 0$^{fr}$,507, — on se rendra compte de l'écrasante supériorité des procédés de la construction américaine.

Cette supériorité assure aux entrepreneurs de ce pays un facile triomphe, sur tous les marchés du monde où la libre concurrence est permise.

Un seul exemple suffira pour le montrer. En 1886, le Gouvernement des Nouvelles-Galles du Sud ouvrait un concours entre les constructeurs du monde entier, pour la construction du pont de Hawkesbury. Sur quatorze concurrents, les trois premiers classés furent les seuls concurrents américains. Une grande maison française avait soumissionné; elle fut classée treizième, par ordre de prix, avec un projet d'ailleurs inexécutable.

Le marché fut confié à l'Union Bridge Co, de New-York,

qui, en deux ans et quatre mois, achevait (*fig.* 8) l'une de ses œuvres les plus difficiles et les plus remarquables ([1]).

Enfin, les ouvertures que permettent de franchir les méthodes américaines montrent leur puissance.

Le système cantilever se prête *pratiquement* à des portées de $600^{m}$ à $700^{m}$, et même davantage.

Les ponts suspendus rigides peuvent atteindre, dans des conditions comparables d'économie, $900^{m}$ à $1000^{m}$ d'ouverture.

Enfin, on a même imaginé un système mixte, à consoles, avec travée centrale suspendue à des câbles, qui permettrait de franchir une ouverture de $1600^{m}$ — le mille américain.

Il serait, d'ailleurs, injuste de reprocher aux systèmes de construction américains de ne permettre que des formes peu

Fig. 31.



Vue du pont de Lachine, sur le Saint-Laurent.

artistiques. Le métal ne se prête évidemment pas, au même degré que la pierre, à la confection d'œuvres monumentales. Mais il n'est pas besoin d'aller en Amérique pour rencontrer

---

([1]) Les piles durent être foncées par dragage jusqu'à $50^{m}$ de profondeur; et, en raison de la profondeur de l'eau et du danger des tempêtes, les sept travées de $126^{m}$ durent être successivement amenées à flot.

des constructions métalliques disgracieuses et inélégantes, qui choquent la vue.

Le propre de la construction américaine est, du moins, de mettre en relief le rôle des organes, par leur forme, — ce qui passe pour une règle d'esthétique, en architecture. Et l'on peut voir sur nombre d'exemples que, maniées par des hommes de goût, les méthodes américaines ne le cèdent en rien aux nôtres : les ponts de Brooklyn, de North-Side, de Saint-Louis, Washington, des Marchands, de Poughkeepsie, sont, chacun dans leur genre, de magnifiques spécimens de l'art de l'ingénieur; et la *fig.* 31 montre qu'une poutre Linville même, comme le *cantilever volant* de Lachine, peut ne point trop

Fig. 32.



Pont de la *Royal Gorge* de l'Arkansas.

gâter un aussi joli paysage que celui des rives du Saint-Laurent, — éloge que mériteraient peu de poutres métalliques.

Enfin, le caractère essentiel des méthodes américaines, celui qui en rend l'étude infiniment fructueuse, c'est leur souplesse, leur faculté d'adaptation aux conditions les plus

diverses, qui permet de triompher à peu de frais d'obstacles qui, chez nous, sembleraient quelquefois insurmontables.

J'en donnerai seulement un exemple : le chemin de fer à voie étroite Denver & Rio-Grande circule, sur de longues étendues, au fond de *canyons* resserrés, profondes coupures à parois presque verticales, de $400^m$ de hauteur et même davantage, qui sillonnent les hauts plateaux du Colorado. En maint endroit, on a dû prendre, pour établir la plate-forme, sur le lit même du torrent; mais, en un point de la Gorge Royale de l'Arkansas, la largeur était tellement réduite qu'il eût été dangereux de recourir à une telle solution. Un coûteux tunnel semblait s'imposer : qu'ont fait les ingénieurs américains? Ils ont lancé par-dessus le torrent une plate-forme métallique, dont les poutres sont supportées par de véritables *piles suspendues*, arc-boutées, de part et d'autre, contre les deux parois du rocher. On eût difficilement imaginé une solution à la fois plus simple et plus économique (*fig.* 32).

Messieurs, conclure, c'est choisir.

Or, nous avons vu, d'une part, que la *rivure*, exclusivement usitée en Europe jusqu'à ce jour, présente incontestablement les *vices originels* suivants : indétermination des *efforts* et de la *résistance*, qui demeurent problématiques, en dépit des *hypothèses* et des *théories*; lenteur et imperfection de la construction, qui doit s'exécuter en majeure partie sur le chantier; enfin, comme conséquence, élévation forcée du poids et du prix de revient.

Tout autres nous apparaissent, d'autre part, les méthodes américaines, qui reposent sur l'emploi de l'*articulation*. Elles dérivent, tout d'abord, d'un *principe essentiellement juste*, puisqu'elles ont pour but la *connaissance exacte* des *efforts* et de la *résistance*, et l'*emploi rationnel* des métaux dans *toutes les parties des ouvrages*. Grâce à la perfection des procédés d'exécution, ce but est maintenant *rigoureusement atteint, — aussi rigoureusement, du moins, qu'il est possible dans un système matériel*. La *facilité* et la *rapidité de montage* qui en résultent permettent de réaliser d'*invraisemblables tours de force; la parfaite utilisation de la ma-*

*tière entraîne un allègement considérable des constructions : et l'économie définitive est telle, par rapport aux résultats des procédés europeens, qu'elle défie désormais toute concurrence sur un terrain neutre.*

Quel esprit exempt de parti pris et détaché de toute considération personnelle pourrait dès lors hésiter dans son choix?

MESSIEURS,

Permettez-moi, en terminant, de remercier mon excellent Maître et ami, le Colonel Laussedat, pour la libéralité d'esprit dont il a fait preuve en m'invitant à venir proclamer, au Conservatoire National des Arts et Métiers, la *supériorité des méthodes américaines* et les avantages qu'il y aurait, pour les ingénieurs et pour les constructeurs français, à savoir se les approprier.

Je ne souhaite point, cependant, de provoquer des imitations hâtives ou inconsidérées, — *qui ne pourraient mener qu'à des désastres* — : les meilleures réformes demandent du temps et de la mesure. Pour réussir dans un art nouveau, il faut des outils nouveaux, un apprentissage nouveau, quelquefois une génération nouvelle; et L'ARTICULATION NE SOUFFRE PAS, COMME LA RIVURE, LA MÉDIOCRITÉ DE CONCEPTION OU D'EXÉCUTION.

Je n'ai même pas la prétention de convertir tout le monde; car je ne me dissimule pas qu'il me faudrait encore, sans doute, triompher, chez quelques-uns, de ces *raisons du cœur que la raison ne comprend pas.*

Mais si j'ai pu vous inspirer le désir de mieux connaître l'œuvre et la méthode des ingénieurs américains, si souvent et si injustement décriées *parce qu'elles sont ignorées,* ma tâche est en bonne voie : le temps et la réflexion feront le reste.

NOTA. — *On n'a pu reproduire toutes les figures projetées à la Conférence. Les figures* 1, 3, 4, 5, 6, 8, 9, 11, 12, 13, 14, 15. 16, 17, 19, 20, 21, 23, 24, 25, 26, 28 *et* 32 *sont extraites de l'Ouvrage de M.* L. LE ROND : « *Les Travaux Publics de l'Amérique du Nord* » (*J. Rothschild, éditeur,* 13, *rue des Saints-Pères, Paris*).

## PROGRAMME, POUR L'ANNÉE 1896-97,

# DES COURS PUBLICS ET GRATUITS DE HAUT ENSEIGNEMENT

### DU CONSERVATOIRE NATIONAL DES ARTS ET MÉTIERS ([1]).

**Géométrie appliquée aux Arts** (les lundis et jeudis, à neuf heures). — M. A. LAUSSEDAT, professeur; M. P. HAAG, professeur suppléant.

*Cinématique.* — Classification des mécanismes. — Étude géométrique des organes qui servent à la transformation des mouvements : Engrenages, cames, excentriques, articulations, échappements, encliquetages. — Compteurs. — Instruments enregistreurs.

**Géométrie descriptive** (les lundis et jeudis, à sept heures trois quarts). — M. E. ROUCHÉ, professeur.

*La coupe des pierres.* — Murs. — Portes. — Descentes. — Ponts biais. — Trompes. — Arrière-voussures. — Voûtes de révolution. — Voûtes en arc de cloître. — Voûtes d'arêtes. — Lunettes. — Escaliers.

**Mécanique appliquée aux Arts** (les lundis et jeudis, à sept heures trois quarts). — M. J. HIRSCH, professeur.

*La machine à vapeur appliquée aux transports.* — Locomotives pour chemins de fer. — Locomotives pour lignes de montagnes. — Plans funiculaires. — Navigation à vapeur sur mer, sur rivières, sur canaux. — Transports à vapeur sur routes de terre.

**Constructions civiles** (les lundis et jeudis, à neuf heures). — M. J. PILLET, professeur.

LES MATÉRIAUX DE CONSTRUCTION. — I. *Propriétés constructives :* Persistance de constitution. — Permanence de figure. — Résistances mécaniques. — Capacité stabilitaire. — Capacité d'isolement. — Capacité formelle. — Capacité économique.

II. *Classification des matériaux :* Matériaux morphogènes. — Matériaux reliants. — Matériaux à résistances symétriques. — Matériaux à constitution permanente. — Matériaux transparents.

---

([1]) Tous ces cours ont lieu le soir et leur durée réglementaire s'étend du 3 novembre au 30 avril.

**Physique appliquée aux Arts** (les lundis et jeudis, à neuf heures). — M. J. Violle, professeur.

*Physique moléculaire.* — Propriétés fondamentales et utilisation des gaz, des liquides et des solides.

*Chaleur.* — Sources de chaleur et de froid. — Mesure des températures. — Machines thermiques. — Chauffage et ventilation.

**Électricité industrielle** (les mercredis et samedis, à sept heures trois quarts). — M. Marcel Deprez, professeur.

Étude des lois fondamentales de l'électricité et du magnétisme au point de vue spécial de leur application à l'industrie. — Lois de la transmission de l'énergie sous toutes ses formes au moyen de l'électricité. — Appareils destinés à la mesure des grandeurs électriques. — Théorie générale des machines destinées à produire un courant électrique au moyen d'un travail mécanique ou inversement.

**Chimie générale dans ses rapports avec l'Industrie** (les mercredis et samedis, à neuf heures). — M. É. Jungfleisch, professeur.

*Généralités.* — Notions préliminaires; corps simples et corps composés; classification des corps simples; métalloïdes et métaux; lois des actions chimiques; nomenclature.

*Métalloïdes.* — Histoire particulière des principaux métalloïdes et de leurs combinaisons non métalliques les plus utilisées; production, propriétés, réactions, notions analytiques, applications à l'industrie.

**Chimie industrielle** (les mardis et vendredis, à neuf heures). — M. Aimé Girard, professeur, remplacé, en cas d'empêchement, par M. É. Fleurent.

*Matières végétales.* — Notions générales sur leur structure et leur composition chimique. — Légumes et fruits; leur valeur alimentaire, procédés de conservation. — Bois: emplois divers, altération, conservation. — Céréales; mouture des grains, meules et cylindres. — Farines, leur analyse, etc. — Huiles végétales. — Essences odorantes, térébenthine, résines et vernis.

**Métallurgie et Travail des métaux** (les mardis et vendredis, à sept heures trois quarts). — M. U. Le Verrier, professeur.

Étude de l'outillage métallurgique. — Appareils servant à la préparation mécanique des minerais: fours et machines employés dans le traitement métallurgique. — Machines à mouler. — Machines à travailler les métaux; marteaux, laminoirs, presses, etc. — Machines-outils.

**Chimie appliquée aux industries de la Teinture, de la Céramique et de la Verrerie** (les lundis et jeudis, à sept heures trois quarts). — M. V. de Luynes, professeur.

Matières colorantes. — Étude chimique des fibres végétales et animales. — Teinture, impression, blanchiment, mordants, épaississants. — Procédés mécaniques. — Principaux genres d'impression. — Papiers peints.

**Chimie agricole et Analyse chimique** (les mercredis et samedis, à neuf heures). — M. Th. Schlœsing, professeur; M. Th. Schlœsing fils, professeur suppléant.

*Atmosphère.* — Étude des éléments de l'atmosphère qui concourent à la nutrition des plantes : oxygène; azote; acide carbonique; acide nitrique; ammoniaque ; vapeur d'eau. — Poussières organisées de l'atmosphère; fermentations.

*Sols.* — Constitution; relations avec l'atmosphère et avec l'eau; nitrification; dosage des principes fertilisants.

*Analyse appliquée à des produits agricoles.*

**Agriculture** (les mardis et vendredis, à neuf heures). — M. L. Grandeau, professeur.

Mise en valeur et culture des terrains pauvres: chaulage, marnage, engrais verts, légumineuses, fumures minérales.

Fumiers de ferme : production, valeur, traitement, conservation.

Cinq années d'expériences culturales au Parc des Princes (1891-1896). — Blé, avoine, plantes sarclées, fumure verte. — Discussion des résultats.

**Travaux agricoles et Génie rural** (les mercredis et samedis, à sept heures trois quarts). — M. Ch. de Comberousse, professeur, remplacé, en cas d'empêchement, par M. Ch. Vigreux.

Introduction : la Ville et la Campagne. — Tableau succinct de la production et de la culture françaises.

*Description et étude spéciale de la Ferme.* — Bâtiments ruraux. — Éléments et conditions de leur construction. — Notions sur la résistance des matériaux.

Dépendances de la ferme: Logements et hygiène générale des animaux. — Écuries, étables, bergeries. — La basse-cour, le poulailler et le colombier.

**Filature et Tissage** (les mardis et vendredis, à sept heures trois quarts). — M. J. Imbs, professeur.

Filage, métiers continus, métiers à renvidage intermittent. — Préparation et filage particuliers de la laine cardée. — Retordage, câblage, tressage.

Classification générale des tissus. — Tissus proprement dits en armures diverses. — Carte représentative d'un tissu quelconque.

**Économie politique et Législation industrielle** (les mardis et vendredis, à sept heures trois quarts). — M. É. Levasseur, professeur.

*Production des richesses.* — Comment s'est formée la science économique. — Théorie de la production de la richesse. — Les richesses naturelles. — Le travail de l'homme. — Le capital. — Le rôle de l'intelligence dans la production. — Propriété, collectivisme et communisme. — La liberté individuelle et les fonctions de l'État.

**Économie industrielle et Statistique** (les mardis et vendredis, à neuf heures). — M. André Liesse, professeur.

Circulation des richesses. — *L'échange :* Analyse de ses éléments généraux. — *Conditions matérielles des échanges :* Les débouchés. — Voies et moyens de transports. — Routes. — L'industrie des chemins de fer en France et dans les principaux pays : organisation ; modes d'exploitation ; tarifs, etc. — Navigation intérieure et maritime. — Postes et télégraphes. — Influence économique de la transformation des moyens de transports et de communication.

**Droit commercial** (les mercredis, à neuf heures). — M. É. Alglave, chargé de cours.

*Des faillites.* — Comparaison des législations étrangères et française. — Historique. — Les diverses formes de la faillite. — L'union des créanciers. — Les divers concordats. — La liquidation judiciaire. — Les créanciers hypothécaires.

**Économie sociale** (les samedis, à neuf heures). — M. P. Beauregard, chargé de cours.

*Caisses d'épargne :* Leur organisation en France et à l'étranger, questions actuelles.

*L'assurance :* Principes de l'assurance, sociétés de secours mutuels, caisses de retraite, assurances contre les accidents, sur la vie, contre le chômage forcé. — L'assurance obligatoire.

*L'assistance :* Assistance légale. — Assistance publique. — Assistance privée. — Sociétés de bienfaisance.

# TABLE DES MATIÈRES

CONTENUES DANS

LE TOME HUITIÈME DE LA DEUXIÈME SÉRIE.

PLANCHES.

Paris. — Imp. Gauthier-Villars et fils, 55, quai des Grands-Augustins.